



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO

para

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

Secretaría de Estado de Medio Ambiente

Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar

3.1 ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE COSTAS

INFORME ESPECÍFICO

PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

(E.S.T. 2017-2020/95)

TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 22-417-5-001

Madrid, febrero de 2021

Centro de Estudios de Puertos y Costas



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

TÍTULO:

3.1 ESTUDIOS DE INGENIERÍA DE COSTAS

**PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL
EBRO**

CLIENTE:

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Secretaría de Estado de Medio Ambiente
Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar

EL PRESENTE INFORME CONSTITUYE UN DOCUMENTO OFICIAL DE ESTE TRABAJO Y, DE ACUERDO CON LAS NORMAS GENERALES DEL ORGANISMO, SU ENTREGA SUPONE EL CUMPLIMIENTO DE LAS ACTUACIONES TÉCNICAS DEL MISMO REFERENTES A LA MATERIA OBJETO DEL INFORME.

VALIDEZ OFICIAL

VISTO EL CONTENIDO DEL INFORME Y SIENDO ACORDE CON LAS CLAUSULAS DEL CONVENIO DE COLABORACION CORRESPONDIENTE, SE PROPONE AUTORIZAR SU EMISIÓN.

EL DIRECTOR DEL CENTRO DE ESTUDIOS
DE PUERTOS Y COSTAS

Fdo. José M^º Grassa Garrido

AUTORIZA LA EMISIÓN DEL INFORME:

Madrid, a de febrero de 2021

EL DIRECTOR DEL CEDEX

P.V. (Art. 10.8 R.D. 1136/2020, modif. D.F. 2.1 R.D. 638/2010)

(BOE de 15 de mayo de 2010)

El Director del Centro de Estudios Hidrográficos

Federico Estrada Lorenzo

SÓLO SON INFORMES OFICIALES DEL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX) LOS REFRENDADOS POR SU DIRECCIÓN.



PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

ÍNDICE

MEMORIA

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes y objeto	1
1.2	Contenidos del Informe Técnico	3
2	VALORES AMBIENTALES DEL DELTA DEL EBRO	5
2.1	Unidades naturales más destacadas del paisaje	5
2.2	Biodiversidad	6
2.3	Espacios de la Red Natura 2000	8
2.3.1	ZEPA - ES0000512 Espacio marino del Delta de l'Ebre - Illes Columbretes.....	8
2.3.2	ZEC ES0000020-Delta de l'Ebre	9
2.4	Objetivos y medidas de conservación	11
3	PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO	12
3.1	Caracterización actual de los sedimentos en Ribarroja y Mequinenza.....	13
3.2	La dificultad de movilización de sedimentos en Ribarroja y Mequinenza	14
3.3	El transporte de sedimentos por el río Ebro hasta el delta del Ebro y el papel de la cuenca aguas abajo de Flix	14
3.4	Plan de actuación previsto y estado de implantación	15
3.5	Conclusiones	17
4	PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL BORDE LITORAL DEL DELTA DEL EBRO	17
4.1	Dinámica litoral del Delta	17
4.1.1	Caracterización de fuentes y sumideros.....	17
4.1.2	Transporte longitudinal de sedimentos.....	22
4.1.3	Balance sedimentario	23
4.1.4	Comportamiento general del Delta del Ebro	24
4.2	Efectos del cambio climático.....	24
4.2.1	Proyección de variables climáticas marinas en el Delta del Ebro.....	24
4.2.2	Efectos de la subida del nivel del mar sobre el Delta	27
4.2.3	Alternativas generales de adaptación	31
4.3	Tipos de actuaciones y sus condicionantes.....	31
4.3.1	Problemas del Delta	31
4.3.2	Principios y tipos de actuación en el Delta del Ebro.....	32
4.4	Propuesta de actuaciones costeras.....	35
4.4.1	Resumen	35
4.4.2	Zonificación del Delta del Ebro.....	35
4.4.3	Desarrollo temporal de las actuaciones	38
4.4.4	Detalle de las actuaciones propuestas	39



ANEJOS

ANEJO 1: Valores ambientales del Delta del Ebro

ANEJO 2. Resumen divulgativo del “Plan de actuación para la mejora de la gestión del régimen sedimentario en el ámbito del Delta del Ebro”

ANEJO 3. Plan de actuación para la mejora de la gestión del régimen sedimentario en el ámbito del Delta del Ebro

ANEJO 4: Nota Técnica “Caracterización del régimen sedimentario fluvial en el ámbito del Delta de Ebro”

ANEJO 5: Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro

1 Introducción

1.1 Antecedentes y objeto

El presente Informe Técnico ha sido elaborado a solicitud de la Dirección General de la Costa y el Mar (DGCM), del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, dentro del marco de la Encomienda de Servicio Técnico al Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) para la realización de asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico (2017-2020). El Informe Técnico ha sido coordinado por el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC), habiendo participado en su redacción el Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) y el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA).

La **regulación del régimen hidrológico** a través de los distintos embalses en la cuenca del Ebro ha producido un **importante desarrollo económico** en toda la cuenca y un **incremento de la seguridad** frente a inundaciones y sequías, de forma que el paisaje de toda la cuenca del Ebro sería muy distinto si no existiese esta regulación.

Si esta alteración ha sido importante en el régimen de caudales, más aún ha sido en el ámbito del transporte de sedimentos. Los efectos de las **alteraciones del régimen sedimentario** son más lentos y mucho más complejos de resolver que los causados en el régimen hidrológico, lo que hace que hasta el momento no hayan sido tratados con la profundidad que es necesario considerar.

Como resultado de esta regulación y modificación de los usos del suelo en toda la cuenca se ha producido una **reducción drástica de los aportes sedimentarios al curso bajo de la cuenca, que afecta de manera especial al Delta del Ebro**, que sufre desde hace décadas procesos de erosión por el mar y subsidencia, tal como se describe a continuación. Junto con el Delta del Ebro, también aguas abajo de los embalses del curso bajo del río Ebro se produce una erosión importante que produce la incisión en el lecho del río, e incluso, pérdida de conexión con las llanuras de inundación, desestabilización de las orillas, modificaciones en las formas del lecho del río, etc.

En relación con el Delta del Ebro, en particular con el transporte de sedimentos, se puede indicar de forma esquemática que el Delta está sometido a **dos presiones** complejas que deben ser tratadas de forma diferenciada, pero coordinada:

- La **erosión por el mar**, para lo cual es necesario un aporte de material grueso que permita incrementar la disponibilidad de sedimentos gruesos en el litoral.
- La **subsidencia**, para lo cual es necesario un aporte de material (finos y gruesos) en las zonas emergidas del Delta que compense la subsidencia.

En lo que a la erosión por el mar respecta, los procesos de retroceso de la costa desde hace décadas están sobradamente documentados, como se detallará a lo largo de este Informe Técnico. Este retroceso continuado es debido fundamentalmente a la falta de aportes sedimentarios procedentes del río, pero se puede agudizar como consecuencia de la **subida del nivel del mar asociada al cambio climático**. Según diversos estudios consultados, por ejemplo, los recientemente realizados por la [Oficina Catalana del Cambio Climático](#) y por la propia Agencia Catalana del Agua (en particular, por ejemplo, puede destacarse la reciente exposición virtual "[El Delta del Ebro y el cambio climático](#)" organizada por dichas instituciones con la colaboración del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña), el cambio climático provocará la previsible elevación del nivel del mar, un incremento de los temporales, y una mayor temperatura y acidificación.



Recientemente, y aunque todavía no puede relacionarse con el cambio climático, el Delta también se ha visto muy afectado por la **sucesión de temporales marítimos de un carácter extraordinario** que han tenido lugar en 2017, 2020 (borrasca Gloria) y en 2021 (borrasca Filomena), provocando retrocesos de hasta 50 m en las líneas de orilla en algunos tramos de la costa sometida al oleaje exterior. Los efectos de estos temporales en el Delta están bien documentados en diversos estudios del CEDEX.

Los **valores ambientales del Delta del Ebro** son resultado de la singularidad de los distintos tipos de biotopos/ecosistemas presentes en él, como el cauce y riberas del río Ebro, humedales, marismas, sistemas dunares, sistemas costeros y bahías. Todos ellos presentan un alto valor de conservación, si bien **se han visto profundamente alterados por los cambios de uso del suelo tanto de la cuenca vertiente como en el propio delta** (principalmente los arrozales y sus sistemas de riego y drenaje), **y por los aprovechamientos en el medio marino** (acuicultura y piscicultura). También ha influido, en mayor o menor medida, tanto la presencia de infraestructuras hidráulicas en el río, en la cuenca y en el propio delta (presas, canales, filtros verdes), que han llevado a la alteración del régimen hidrológico natural, como la de infraestructuras costeras (actuaciones de protección en la costa), con interacciones asociadas a la dinámica litoral.

A pesar de estos cambios, el Delta del Ebro alberga una rica biodiversidad, baste citar para ello la presencia de cerca de 360 aves de las 600 existentes en Europa, que utilizan el territorio para nidificar, invernar y como zona de descanso durante las migraciones. Destaca también la presencia de distintas especies de reptiles, peces e invertebrados, especialmente la nacra (*Pinna nobilis*), que actualmente se encuentra en un grave estado de declive, siendo el Delta y el Mar Menor los únicos espacios españoles en donde todavía se mantiene poblaciones de esta especie.

Además cabe destacar la aparición, cada vez más frecuente de **especies exóticas**, algunas de ellas con carácter invasor en el espacio del Delta (mejillón cebra, caracol manzana, gambusia, uña de gato, etc.) estimadas en 200 con carácter permanente o temporal y para las que alguna de ellas, se han establecido planes específicos para su control y posible erradicación.

Todo ello ha llevado a la necesidad de preservar y mejorar los espacios naturales todavía presentes. Con ese fin, se han establecido diversas **figuras de protección de espacios en el ámbito nacional y autonómico** (Red Natura 2000 –ZEC y ZEPA-, humedales RAMSAR, o Inventario Español de Zonas húmedas –IEZH-). De la misma forma, también **se han protegido especies singulares de flora y fauna** presentes en la zona del Delta (como el Fartet y el Samaruc), en listados y catálogos de especies protegidas y amenazadas o en riesgo de extinción. En muchos de los casos con sus correspondientes planes de gestión.

Por otro lado, los usos actuales del suelo, fundamentalmente arrozales y del medio marino y costero como la acuicultura, la pesca y actividades náuticas relacionadas con el turismo, tienen una especial importancia desde el punto de vista socioeconómico, constituyendo un pilar fundamental en la economía, en la identidad cultural y en la fijación de población del entorno del Delta del Ebro.

La gestión del Delta del Ebro es compleja y necesita de un sólido equilibrio, basado en los distintos planes de actuación, tanto derivados de la **gestión del litoral**, como de la **gestión de sus espacios naturales** y de los **usos del Delta** -en especial de la pesca y el regadío- y de la **gestión hidrológica del río Ebro** y afluentes, más afectados aún con el cambio climático.

Todo ello ha motivado que la Secretaría de Estado de Medio Ambiente haya impulsado el **“Plan para la protección del Delta del Ebro”**, que incluye tanto actuaciones en el ámbito fluvial como actuaciones en la costa, y con el que se pretende fomentar y facilitar su uso público, así como mantener los valores

ambientales del Delta, teniendo en cuenta los retos que presenta el cambio climático, en particular la subida del nivel del mar.

En la elaboración de este Plan han participado la **Dirección General de la Costa y el Mar**, la **Dirección General del Agua y la Confederación Hidrográfica del Ebro**, con el soporte técnico y científico del CEDEX, este último a través del Centro de Estudios de Puertos y Costas, el Centro de Estudios Hidrográficos y el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Todos estos **organismos están trabajando de forma conjunta**, para desarrollar a corto, medio y largo plazo distintas acciones que, fomentando el conocimiento y la transparencia, permitan paliar o gestionar los problemas derivados de la gestión del Delta en la actualidad y ante los previsibles efectos del cambio climático.

En el desarrollo de estas acciones se tendrán especialmente en cuenta los trabajos realizados con anterioridad por **otras administraciones** con competencias en el Delta, en particular con la Generalitat de Cataluña, y sus instituciones (universidad y agencias); asimismo, se han tenido en consideración todas aquellas aportaciones de entidades con intereses en la zona.

1.2 Contenidos del Informe Técnico

Como se ha indicado anteriormente, el “**Plan para la protección del Delta del Ebro**” incluye tanto actuaciones en el ámbito fluvial como actuaciones en la costa. A continuación se resumen los contenidos de este Informe Técnico.

En primer lugar se describen los principales **valores ambientales del Delta del Ebro**, cuya importancia ya se ha resaltado en el apartado anterior. Esta descripción ha sido realizada por el Centro de Estudios y Técnica Ambientales del CEDEX. En el Apartado 2 se presenta un resumen de los contenidos que, por su extensión, se incluyen en el **Anejo 1**, elaborado por el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX.

Ya en el ámbito fluvial el Plan se ha elaborado por parte de la Dirección General del Agua (que ha contado con la colaboración del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y de la Confederación Hidrográfica del Ebro), la cual ha redactado el documento “**Plan de Actuación para la mejora de la gestión del régimen sedimentario en el ámbito del Delta del Ebro**”, que se resume en el **Apartado 3** y se incluye en los **Anejos 2 y 3**. Cabe resaltar que este Plan formará parte del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro del tercer ciclo, para lo cual se establecen una serie de conclusiones y líneas de actuación que se formalizan en una “hoja de ruta” para mejorar el tránsito sedimentario en la cuenca del Ebro en los próximos años.

Además de este Plan, y por su interés para este Plan, se incluye también como **Anejo 4** la Nota Técnica “**Caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Mequinenza y Ribarroja y en el curso bajo del río Ebro**”, elaborada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en mayo de 2020 en el marco de la colaboración entre administraciones mencionada anteriormente.

Finalmente, en el ámbito marítimo el “**Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro**” se ha realizado por parte de la Dirección General de la Costa y el Mar, con el soporte del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, con el objetivo de describir un conjunto de actuaciones a lo largo de la costa del Delta del Ebro para su protección y defensa ambiental, que aborde los retos que presenta el cambio climático, en particular la subida del nivel del mar. Dicho Plan se presenta en el **Apartado 4** y comprende un conjunto de estudios relativos a los valores ambientales del Delta, su dinámica litoral y los previsibles efectos del cambio climático. Estos estudios han permitido identificar los diversos problemas del Delta y definir un conjunto de alternativas cuyo análisis ha dado lugar finalmente a la propuesta de las actuaciones costeras necesarias para la mejora de la situación actual del Delta y el incremento de su resiliencia.



Una de las primeras tareas llevadas a cabo ha sido la **recopilación de diversos estudios y proyectos sobre el Delta**, especialmente aquellos centrados en la dinámica litoral y riesgos del cambio climático en el Delta del Ebro. Esta recopilación incluye trabajos realizados recientemente por instituciones como la Generalitat de Cataluña, la Oficina Catalana del Cambio climático y el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universidad Politécnica de Cataluña, lo cual se considera fundamental para definir la estrategia general a adoptar. Por su extensión, los resultados de esta recopilación no se incluyen en esta Memoria, pero pueden consultarse en el **Anejo 5, apartado 2** del presente Informe Técnico. De los estudios analizados se destacan los siguientes:

- “Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro” (LIM y U. de Barcelona, 1999-2000).
- “Estrategia para la gestión sostenible de la costa. Demarcación hidrográfica del Ebro: Documento de diagnóstico preliminar (julio, 2007)” (Taller de Ingeniería Ambiental, S.L., 2007).
- “Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña. Número 1: el Delta del Ebro. Documento de síntesis” (Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, 2008).
- “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión de la desembocadura y cauce inferior del río en el delta del Ebro (Tarragona)” (Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria -IHAC- Universidad de Cantabria, julio de 2011).
- “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero del Delta del Ebro” (LIM, 2011).
- “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero, desembocadura y cauce inferior del delta del Ebro” (IHAC y LIM, 2012).
- “Informe síntesis sobre la vulnerabilidad del delta del Ebro. Propuesta de medidas generales en el ámbito del Delta” (Berga y Berga, 2017) para la Comunitat de Regants del Canal de la Dreta.
- “Accions per al clima al Delta de l’Ebre (ACDE)-Diagnosi” [*“Acciones por el clima del Delta del Ebro-Diagnóstico”*]; Oficina Catalana del Canvi Climatic (2017).
- “Análisis de la ‘Propuesta de medidas generales en el ámbito del Delta’ incluida en el ‘Informe-síntesis sobre vulnerabilidad del delta del Ebro’” (LIM, 2018).

A partir de esta recopilación y análisis de estudios previos, el Plan continúa analizando específicamente dos cuestiones fundamentales en el comportamiento pasado, presente y futuro del Delta, y que son:

- **Dinámica litoral** del Delta: que resume el profundo análisis que se ha llevado a cabo de las fuentes sedimentarias, transporte de sedimentos y balance sedimentario del Delta del Ebro, y que por su extensión se incluye como Anejo a este Informe Técnico (**Anejo 5, apartado 4**).
- **Efectos del cambio climático**. Este apartado recoge los principales resultados de diversos estudios específicos sobre la costa del Delta, incluyendo también un análisis complementario de los efectos del cambio climático en las playas urbanas y playas tipo barrera. Como en los casos anteriores, por su extensión el contenido completo de este estudio se incluye en el **Anejo 5, apartado 5**.

Una vez descritos los valores medioambientales del Delta, así como los principales procesos costeros y climáticos que influyen en su evolución, o pueden afectarlo a lo largo de este siglo, el Plan finaliza con dos apartados más extensos dedicados al análisis de las alternativas para proteger al Delta frente a sus diversos problemas y la propuesta preliminar de un plan de actuaciones de protección. Estos dos apartados son:

- **Tipos de actuaciones y sus condicionantes**, cuyos contenidos se desarrollan en el **Anejo 5, apartado 6**.
- **Zonificación y propuestas de actuaciones**. En esta Memoria se describe de manera resumida el conjunto de actuaciones propuestas; los cálculos justificativos se desarrollan pormenorizadamente en el **Anejo 5, apartado 7**.

2 Valores ambientales del Delta del Ebro

Los valores y usos de la plataforma deltaica, son básicamente cuatro: Medioambientales, agrícolas, pesqueros y urbanos-turísticos. Todos ellos son condicionantes esenciales de las posibles actuaciones que puedan realizarse en él, tanto para preservar sus valores como para mantener sus usos.

Dentro de todos ellos son relevantes los espacios con alto interés medioambiental. La práctica totalidad de la franja costera del Delta del Ebro está constituida por espacios naturales protegidos: o bien por el Parque Natural del Delta del Ebro; o Zonas de Interés Natural aledañas. Solamente queda excluido de esta protección un pequeño tramo al este de San Carles de la Rápita.

El Delta del Ebro es la zona húmeda más grande de Cataluña y una de las más importantes de Europa occidental junto con el parque nacional de Doñana y el parque regional de la Camarga (Francia). A fin de garantizar la conservación de sus especiales características biológicas y paisajísticas fue declarado parque natural en agosto de 1983, con la denominación oficial de Parc natural del Delta de l'Ebre, y ampliado en 1986. Es zona ZEPA, espacio del Convenio de Ramsar y forma parte de la Reserva de la biosfera de las Tierras del Ebro. Dentro del Parque se significan ocho zonas de especial interés natural: Les Olles, península del Fangar, el Canal Vell y el Garxal, en el hemidelta norte; e Illa de Buda, la Tancada, península de la Banya y la Encanyssada, en el hemidelta sur. Entre todas ellas, se encuentran en grave peligro erosivo la Illa de Buda, por lo que merece un especial interés de protección costera.

Debe significarse que la península de la Banya, como zona de especial interés medioambiental, y la barra del Trabucador están íntimamente relacionadas; con respecto a la Barra, su evolución e integridad condiciona la protección de la nacra (*Pinna nobilis*), que se da en la bahía de los Alfaques¹: Esta circunstancia hace que la protección de la barra del Trabucador sea de especial interés medioambiental.

2.1 Unidades naturales más destacadas del paisaje

A continuación se describen brevemente a nivel de paisaje los principales elementos que se reconocen en este espacio y sus valores ambientales más destacables (Figura 1).

Los elementos singulares del paisaje del delta del Ebro se describen brevemente a continuación:

Dunas móviles

En el delta se localizan playas arenosas a partir de las cuales se ha originado un extenso y dinámico paisaje dunar. Las dunas están ligadas al transporte de los sedimentos de las playas de modo que dependen de su proximidad al mar y de los vientos. Asociadas a estas dunas encontramos unas comunidades de plantas y fauna silvestres muy características, dependientes de sus peculiares condiciones ambientales.

¹ Según el del Grupo de Aguas Marinas y Continentales (AMiC)-IRTA, la abertura por rotura de la barra del Trabucador pone en riesgo su conservación porque permite la entrada del parásito *Haplosporidium pinnae* que provoca mortalidades cercanas al 100% de la población.

Conforman ecosistemas muy sensibles a las actividades humanas, como por ejemplo la urbanización del litoral, el paso de personas y vehículos y el uso de maquinaria, de donde se deriva el interés por su conservación.



Figura 1. Imagen satélite del Parc Natural del Delta de l'Ebre señalando las zonas más emblemáticas

Lagunas

Las lagunas del delta en algunos casos reciben aportaciones de agua de mar durante los temporales de levante, especialmente en invierno, de modo que presentan una salinidad más elevada. En estos casos se encuentran rodeadas de vegetación típica de salobrar (comunidad *Arthrocnemum fruticosi*) donde predomina la salicornia. Otras reciben agua dulce de los arrozales y de los canales, presentando comunidades muy diferentes de las anteriores, tanto las sumergidas como las de carácter helofítico que rodean las lagunas. Algunas lagunas se encuentran comunicadas directamente con el mar mediante canales, unas veces naturales y otras artificiales, mientras que otras carecen de estos canales. En las salinas aparecen comunidades características como son las junqueras halófilas.

Bosque de ribera

Las únicas comunidades forestales del delta son las alamedas de los márgenes del río Ebro. En las riberas salobres y en las dunas húmedas se encuentran los tarajes.

2.2 Biodiversidad

Sobre el marco físico descrito se desarrollan la flora y la fauna del delta del Ebro que se describe a continuación.

Flora

En el delta los suelos presentan un acusado gradiente de salinidad que oscila desde los suelos salados hasta las tierras fértiles aptas para el cultivo. La diversidad vegetal a que da lugar permite el desarrollo de extensas comunidades características de las zonas húmedas en un estado de conservación notable.

Las comunidades más importantes son las **salinas**, en las que el agua marina penetra en la capa freática y al evaporarse concentra las sales en la superficie. La vegetación halófila de terrenos salinos agrupa las comunidades vegetales *Arthrocnemum fruticosi*, *Schoeno-Plantaginetum crassifoliae*, *Salicornietum emerici* y *Crucianelletum maritimae*, bien representadas cerca de las salinas de San Antonio, en la Cerrada, y en las de la Trinidad, en la Punta del Cuerno.

La comunidad helofítica que rodea a las lagunas está conformada por cañaverales y carrizales, en algunos casos extensos, como en la isla de Buda, donde se conocen localmente como “quemados”. Su importancia es extrema por retener los sedimentos arrastrados por el viento y evitar la erosión de las cubetas y constituyen un recurso necesario para las aves acuáticas. Sus comunidades son *Typho-Schoenoplectetum glauci* y *Scirpetum maritimi-littoralis*. En la zona denominada Los Colmillos (surgencias de agua dulce en la parte occidental del hemidelta sur) se puede encontrar la comunidad *Potamogetum denso-nodosi*, rica en nenúfar (*Nymphaea alba*). En algunas lagunas la acción de los fitosanitarios empleados en los cultivos ha reducido considerablemente la extensión de la vegetación.

En las dunas más estables aparecen comunidades vegetales psammófilas, adaptadas a la movilidad del suelo, la alta permeabilidad y un elevado índice de reflexión solar. Estas comunidades vegetales de las dunas o *Ammophiletea*, que están más o menos fijadas, corresponden a las comunidades *Agropyretum mediterraneum*, *Ammophiletum arundinaceae* y *Crucianelletum maritimae*, como más importantes. Son características de estas zonas *Ammophila arenaria* (barrón), *Euphorbia paralias* y *Limoniastrum monopetalum* (salado).

Entre la vegetación riparia (*Populetalia* y *Nerio Tamaricetea*) sobresale *Populus alba*, especialmente presente en la Isla de Gracia, y que forma parte de la comunidad *Vinco-Populetum albae*. Otra comunidad de este tipo que puede encontrarse es la *Arundini-Convolvuletum sepium*. En las riberas salobres y en las dunas húmedas podemos encontrar los tarajes (*Tamarix gallica*), pertenecientes a la comunidad *Tamaricetum canariensis*.

Fauna

El humedal del delta del Ebro es de importancia internacional para cientos de especies de fauna vertebrada, siendo la mayoría aves. El delta del Ebro alberga unas 360 aves de las 600 existentes en Europa. 95 son nidificantes y muchas otras invernan, reposan y se alimentan durante las migraciones. También destacan por su singularidad algunas especies de reptiles, peces e invertebrados, especialmente la nacra (*Pinna nobilis*), que actualmente se encuentra en un grave estado de declive.

Precisamente, este riesgo inminente de extinción de la nacra ha llevado a su declaración en situación crítica, por la Orden TEC/1078/2018, de 28 de septiembre, siguiendo el dictado del artículo 60 apartado 2 de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y la Biodiversidad. La declaración de situación crítica conlleva que las obras y proyectos encaminados a su recuperación tendrán la consideración de interés general y su tramitación tendrá carácter de urgencia.

La principal causa de la desaparición de este molusco ha sido el protozoo parásito *Haplosporidium pinnae*. A principios de 2016 se produjo un primer brote que hizo desaparecer el 99% de las poblaciones de esta especie de la costa española. Actualmente, las poblaciones de nacra común se consideran casi extinguidas por toda la costa española y solo se puede localizar ejemplares aislados. Las únicas poblaciones que se mantienen están localizadas en la zona del delta del Ebro y en la del mar Menor.

(Fuente: La nacra amenazada de peligro de extinción; aquarium de Barcelona, 2020)

2.3 Espacios de la Red Natura 2000

Se indican en este epígrafe los principales elementos que forman parte de RN 2000 en el ámbito del Delta del Ebro.

2.3.1 ZEPA - ES0000512 Espacio marino del Delta de l'Ebre - Illes Columbretes

Este espacio marino ocupa una superficie de 9.017,08 km² y comprende la totalidad de la plataforma y parte del talud continental bajo la influencia directa del río Ebro (Figura 2). Se extiende paralelo a la costa a lo largo de más de 140 km, desde el cabo de Salou al norte hasta el entorno de las Islas Columbretes y Castellón de la Plana al sur. Los aportes sedimentarios del Ebro a lo largo del tiempo explican la presencia de una plataforma continental particularmente amplia en esta zona que, en algunos puntos, se extiende hasta unos 70 km de la costa.

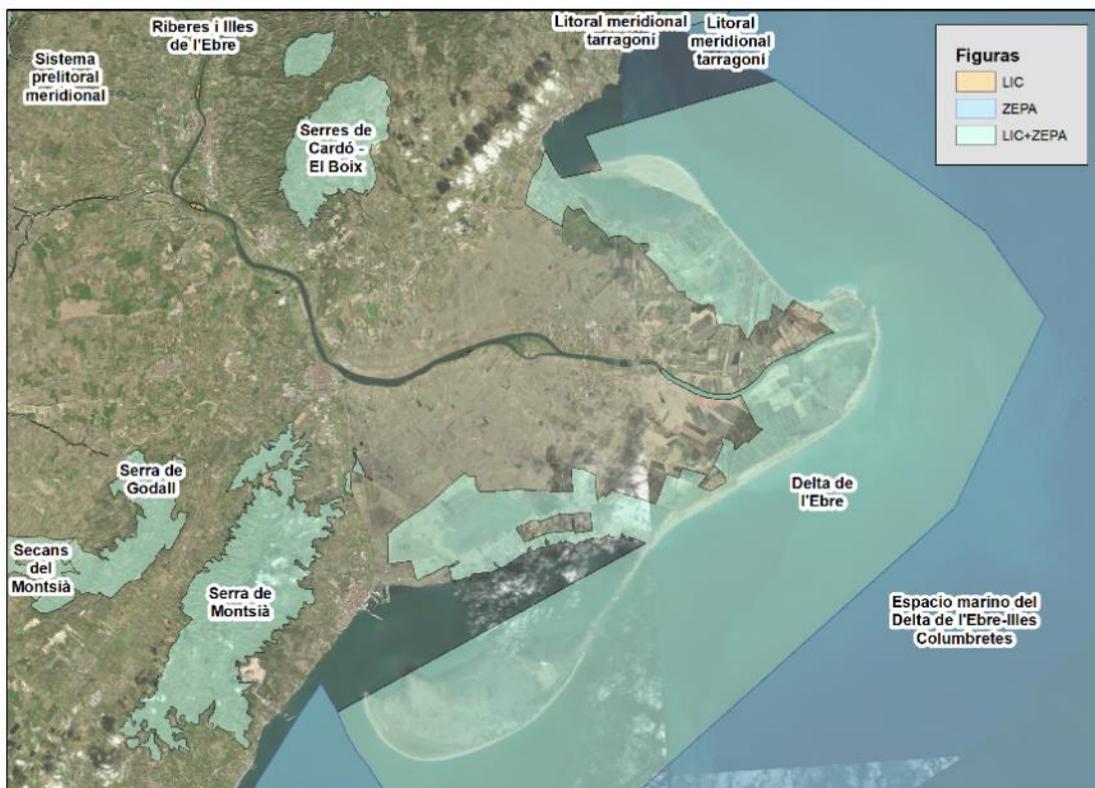


Figura 2. Espacios de Red Natura 2000 en el ámbito del delta del Ebro IDE MITERD

(<https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/>)

Engloba una de las áreas marinas de alimentación más importantes para las aves marinas en todo el Mediterráneo. En el caso de las especies más ligadas a la costa, como gaviotas y charranes, la riqueza en alimento se traduce en la presencia de importantes colonias de cría adyacentes a la zona marina, principalmente en el delta y, en menor medida, en las Islas Columbretes. Cabe destacar entre éstas a la gaviota de Audouin (*Larus audouinii*), que concentra en el delta dos tercios de su población reproductora mundial. En el caso de especies con mayor capacidad de desplazamiento, como pardelas y paíños, un elevado número de individuos se desplaza a alimentarse hasta esta zona desde colonias de cría distantes, principalmente de Baleares, aunque las Islas Columbretes también albergan pequeñas poblaciones reproductoras de pardela cenicienta (*Calonectris diomedea*) y paíño europeo (*Hydrobates pelagicus*).

Asimismo, la zona representa la principal área de invernada para la gaviota cabecinegra (*Larus melanocephalus*) a nivel mundial– y los pasos migratorios de numerosas especies. Especies por las que se declara Zona de Especial Protección para las Aves:

A200 Alca torda	A066 <i>Melanitta fusca</i>	A384 <i>Puffinus puffinus mauretanicus</i>
A193 <i>Sterna hirundo</i>	A065 <i>Melanitta nigra</i>	A464 <i>Puffinus yelkouan</i>
A197 <i>Chlidonias niger</i>	A069 <i>Mergus serrator</i>	A173 <i>Stercorarius parasiticus</i>
A204 <i>Fratercula arctica</i>	A180 <i>Larus genei</i>	A172 <i>Stercorarius pomarinus</i>
A002 <i>Gavia arctica</i>	A016 <i>Morus bassanus</i>	A175 <i>Stercorarius skua</i>
A003 <i>Gavia immer</i>	A604 <i>Larus michahellis</i>	A195 <i>Sterna albifrons</i>
A001 <i>Gavia stellata</i>	A177 <i>Larus minutus</i>	A189 <i>Gelochelidon nilotica</i>
A181 <i>Larus audouinii</i>	A179 <i>Larus ridibundus</i>	A191 <i>Sterna sandvicensis</i>
A183 <i>Larus fuscus</i>	A392 <i>Phalacrocorax aristotelis desmarestii</i>	A010 <i>Calonectris diomedea</i>
A176 <i>Larus melanocephalus</i>		
A014 <i>Hydrobates pelagicus</i>		

2.3.2 ZEC ES0000020-Delta de l'Ebre

Presenta una superficie terrestre de 12.737,98 ha y marina de 35.647,11 ha, en total 48.385,09 ha. El objetivo de esta Zona Especial de Conservación es el mantenimiento del delta, caracterizado por tratarse de un sistema dinámico resultado de un continuo de procesos estructurales y de las transformaciones antrópicas de los últimos años. La población vegetal del Delta es la mejor muestra de la vegetación de marjales y costera del litoral arenoso en Cataluña, que acoge algunos elementos de gran singularidad. La fauna del Delta es particularmente rica y variada y está representada por varios grupos tanto de invertebrados como de vertebrados, entre los que destacan las aves. La gran diversidad de ambientes deltaicos acoge poblaciones faunísticas también diversas, algunas de ellas muy interesantes desde un punto de vista zoogeográfico. El delta constituye un extenso humedal que acoge un conjunto de sistemas naturales, acuáticos y terrestres, de excepcional singularidad y diversidad. Por sus dimensiones y variedad morfológica, constituye la formación deltaica más importante del mediterráneo occidental. La notable diversidad de ambientes se traduce en un paisaje singular con un poblamiento faunístico muy relevante, sobre todo ornitológico. Destaca la presencia de diversas aves con una población muy relevante a nivel de toda la región biogeográfica mediterránea, muy especialmente de *Larus audouinii*.

En la Tabla 1 se recogen las especies de interés comunitario de presencia segura y probable.

Tabla 1. Especies de interés comunitario descritas en el espacio (Anexo II Directiva 92/43, de Hábitats).

Fuente: http://zec2.ctfc.cat/fitxa_espais.php?id=ES0000020&codiRegio=MED

Código	Nombre científico (nombre vulgar)	Elemento clave	Superficie/ longitud en espacio	% sup. región
Especies de presencia segura				
1044	<i>Coenagrion mercuriale</i> (caballito del diablo)	No	1 nº UTM10	3,7
1095	<i>Petromyzon marinus</i> (lamprea marina)	Sí	11,42 km	19,73
1103	<i>Alosa fallax</i> (saboga)	Sí	11,42 km	18,4
1126	<i>Chondrostoma toxostoma</i> (madrilla)	No	4 nº UTM10	4,04
1149	<i>Cobitis taenia</i> (<i>paludicola</i>) (lisa)	Sí	1,97 ha	5,92
1151	<i>Aphanius iberus</i> (fartet)	Sí	2.642,83 ha	85,9
1153	<i>Valencia hispanica</i> (samarugo)	Sí	135,72 ha	72,11
1217	<i>Testudo hermanni</i> (tortuga mediterránea)	Sí	2403 ha	9,82
1220	<i>Emys orbicularis</i> (galápago europeo)	Sí	6 nº UTM10	33,33



1221	<i>Mauremys leprosa</i> (galápago leproso)	Sí	5 nº UTM10	7,58
1224	<i>Caretta caretta</i> (tortuga boba)	Sí	7 nº UTM10	24,14
1304	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i> (murciélago grande de herradura)	No	10.448,55 ha	0,39
1349	<i>Tursiops truncatus</i> (delfín mular)	No	1 nº UTM10	4
1581	<i>Kosteletzkya pentacarpa</i> (malva de agua)	Sí	176,41 ha	78,7
Especies de presencia probable				
1303	<i>Rhinolophus hipposideros</i> (murciélago pequeño de herradura)	No	3,16 ha	0
1324	<i>Myotis myotis</i> (murciélago ratonero grande)	No	123,09 ha	0,01

Incluye además las siguientes Reservas Naturales de Fauna Salvaje: Estación biológica el Canal Viejo, isla de San Antonio, laguna de la Cerrada y Punta del Fangar. Además, incluye las Reservas Naturales Parciales de Punta del Cuerno y de Isla de Sapinya.

Hábitats de interés comunitario

En la tabla siguiente se detallan los 35 hábitats de interés comunitario que se encuentran en el delta, cinco de ellos de interés prioritario (Tabla 2 y Figura 3).

Tabla 2. Hábitats de interés comunitario en el ámbito del Delta del Ebro

Código	Hábitat de interés comunitario
1110	Bancos de arena cubiertos permanentemente por agua marina, poco profunda
1120*	Praderas de posidonia
1130	Estuarios
1140	Llanos costeros arenosos o limosos, a menudo recubiertos de mantos microbianos
1150*	Lagunas costeras
1160	Grandes calas y bahías de aguas someras
1170	Fondos marinos rocosos y concreciones biogénicas sublitoral
1210	Vegetación anual sobre desechos marinos acumulados
1310	Vegetación anual pionera con <i>Salicornia</i> y otras especies de zonas fangosas o arenosas
1320	Espartinas
1410	Pastizales salinos mediterráneos (<i>Juncetalia maritimi</i>)
1420	Matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos (<i>Sarcocornetea fruticosae</i>)
1430	Matorrales halonitrófilos (<i>Pegano-Salsoletea</i>)
1510*	Comunidades halófilas de los suelos de humedad muy fluctuante
2110	Dunas móviles
2120	Dunas móviles de litoral con <i>Ammophila arenaria</i> (dunas blancas)
2190	Depresiones húmedas interdunares
2210	Dunas fijas de litoral <i>Crucianellion maritimae</i>
2230	Dunas con céspedes <i>Malcolmietalia</i>
3140	Aguas oligomesotróficas calizas con vegetación bénticos de <i>Chara spp.</i>
3150	Lagos eutróficos naturales con vegetación <i>Magnopotamion</i> (sumergida) o <i>Hydrocharition</i> (flotante)
3260	Ríos, de pisos de planicie a montano con vegetación de <i>Ranunculion fluitantis</i> y de <i>Callitricho-Batrachion</i>

Código	Hábitat de interés comunitario
3280	Ríos mediterráneos de caudal permanente del <i>Paspalo-Agrostidion</i> con <i>Salix</i> y <i>Populus alba</i>
5320	Formaciones bajas de <i>Euphorbia</i> próximas a los acantilados
5330	Matorrales termomediterráneos y pre-estépicos
6220*	Zonas subestépicas de gramíneas anuales del <i>Thero-Brachypodietea</i>
6420	Prados húmedos mediterráneos de hierbas altas del <i>Molinion-Brachypodietea</i>
6430	Megaforbios eutrofos hidrófilos de las orlas de llanura y de los pisos montano a alpino
7210*	Turberas calcáreas del <i>Cladium mariscus</i> y con especies del <i>Caricion davallinae</i>
8130	Desprendimientos mediterráneos occidentales y termófilos
8210	Pendientes rocosas calcícolas con vegetación casmofítica
92A0	Bosques galería de <i>Salix alba</i> y <i>Populus alba</i>
92D0	Bosquetes y matorrales meridionales de ramblas, arroyos y lugares húmedos (<i>Nerio-Tamaricetea</i>)
9240	Robledales ibéricos de <i>Quercus faginea</i> y <i>Quercus canariensis</i>
9340	Bosques de <i>Quercus ilex</i> y <i>Quercus rotundifolia</i>



Figura 3. Imagen con la localización de Hábitats de Interés Comunitario en el delta.

<https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/>

2.4 Objetivos y medidas de conservación

Existen distintos planes de gestión de los espacios naturales protegidos en la legislación, cuyo fin no es otro que determinar los usos y actividades permitidas en los mismos, con el objetivo de preservar y



mejorar los valores ambientales por los que se les otorga protección. Su estructura, responde a los siguientes epígrafes:

Objetivo marco: Mantener en un estado de conservación favorable los hábitats y las poblaciones de las especies presentes en el espacio.

Objetivos de conservación: Alcanzar los objetivos de conservación, principal y secundarios, definidos en las fichas correspondientes a los elementos considerados como Elementos Clave

Medidas de conservación de posible aplicación en el espacio, entre las que caben destacar las siguientes: Gestión preventiva; Delimitación; Vigilancia; Redacción de Planes de mitigación de la contaminación, de recuperación de especies amenazadas, de control de especies exóticas invasoras; Gestión de formaciones vegetales, de restauración de ecosistemas / hábitats, o de áreas degradadas; Conservación de lugares de interés geológico o geomorfológico; Regulación del uso público; Mejora ambiental de las actividades del sector primario; Coordinación con agentes de desarrollo local; Construcción o adecuación de infraestructuras para especies; Prevención y lucha contra incendios o Cartografía temática.

3 Plan de Actuación para la mejora de la gestión del régimen sedimentario en el ámbito del Delta del Ebro

A comienzos de 2020 la Dirección General de la Costa y el Mar (DGCM) y la Dirección General del Agua (DGA) establecieron una **Mesa Técnica para el Delta del Ebro** con objeto de realizar un diagnóstico de su problemática y sentar las líneas estratégicas de acción para el mismo. Esta Mesa técnica tuvo una primera reunión a finales de febrero en la que participaron, además de la DGA y la DGCM, el CEDEX y la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). En dicha reunión cada organización presentó su experiencia en la gestión del Delta y se identificaron una serie de estudios y trabajos a desarrollar para la mejora del conocimiento sobre la problemática del Delta del Ebro.

En este contexto, la DGA, CHE y CEH han realizado una serie de estudios técnicos durante el año 2020 que han quedado integrados en el documento **“Plan de actuación para la mejora de la gestión del régimen sedimentario en el ámbito del Delta del Ebro”**, redactado por la Dirección General del Agua, que se resume a continuación y que se incluye en el Anejo 3. Anteriormente, en el Anejo 2, se ha incluido un Resumen divulgativo de dicho Plan que resume su estado de implantación en el momento actual (febrero de 2021) y las previsiones de futuro, elaborado también por la Dirección General del Agua.

Dicho Plan sintetiza el estado del conocimiento en materia de dinámica sedimentaria del río Ebro, así como las líneas de actuación futuras para la mejora de su gestión; así, este Plan pretende ser un punto de partida para lograr una acción coordinada entre todas las administraciones y los agentes implicados para lograr una mejora del tránsito sedimentario del río Ebro y de los aportes de sedimentos al Delta del Ebro.

Entre los estudios técnicos elaborados en el desarrollo del Plan cabe destacar el denominado **“Caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Mequinenza y Ribarroja y en el curso bajo del río Ebro”**, elaborado como Nota Técnica en mayo 2020 por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, y que se incluye también íntegramente en este Plan, en el Anejo 4. Los datos de esta caracterización se utilizan y sus fuentes se citan muy especialmente al tratar de las fuentes de sedimento y tipos de actuaciones (apartados **“Dinámica litoral del Delta”** y **“Tipos de actuaciones y sus condicionantes”** de esta Memoria y Capítulos 4 y 6 del Anejo 5 respectivamente). En este contexto, debe

señalarse que a efectos de la protección del Delta del Ebro, en especial de su borde litoral, **es preciso que el sedimento disponible tenga una granulometría compatible con el Delta así como unos niveles de calidad adecuados**, especialmente en lo referente a los niveles de contaminación.

Con todo lo anterior, este Plan de actuación que se presenta en este documento y que formará parte del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro del tercer ciclo, establece una serie de conclusiones y líneas de actuación que establecen una hoja de ruta para mejorar el tránsito sedimentario en la cuenca del Ebro en los próximos años.

En los apartados siguientes se resumen los aspectos más relevantes incluidos en el Plan de actuación para la mejora de la gestión del régimen sedimentario en el ámbito del Delta del Ebro (relativos a la caracterización de los sedimentos en los embalses de Ribarroja y Mequinenza, algunas ideas sobre la dificultad de movilización de estos sedimentos y sobre el transporte de sedimentos por el río Ebro hasta el delta del Ebro y el papel de la cuenca aguas abajo de Flix), así como una síntesis del Plan de actuación previsto y de su estado de implementación.

3.1 Caracterización actual de los sedimentos en Ribarroja y Mequinenza.

Desde la construcción y puesta en marcha de los sistemas de embalse de Mequinenza, Ribarroja y Flix durante la década de 1960, la circulación del régimen de caudales y sedimentos a lo largo del eje del río Ebro se ha modificado notablemente.

En el Plan de actuación se han resumido y analizado todos los estudios existentes hasta la fecha, llegando a las siguientes conclusiones:

Respecto al embalse de Mequinenza, las grandes dimensiones del embalse de Mequinenza, 108 km de longitud y 1483.29 hm³ de capacidad, lo convierten en una barrera que retiene la práctica totalidad del sedimento que llega al embalse por arrastre de fondo y en suspensión. Además, se deposita una parte de los sólidos disueltos.

En cuanto al volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mequinenza en la actualidad se estima que estará en torno a los 240 hm³. Las tasas de aportación de sedimentos al embalse de Mequinenza se estiman en 6,68 Mt/año en el periodo de 1966 a 1982 y en 4,37 Mt/año entre 1982 y 2012. La actual tasa de sedimentación del embalse de Mequinenza se estima en 4,36 Mt/año, equivalente a 3,87 hm³/año.

Por otro lado, los sondeos realizados en el embalse en 2012 han permitido caracterizar el sedimento en este tramo de embalse. Se calcula que, de los 40,2 hm³ de sedimento que existen en este tramo, 10,7 hm³ son de arena y 3,7 hm³ son de grava.

Respecto al embalse de Ribarroja, los estudios realizados en el marco del presente Plan permiten estimar que en la actualidad (2020) la sedimentación de Ribarroja se encuentra entre 15 y 19,3 hm³. Partiendo del valor medio del rango de sedimentación, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0,55 Mt/año, valor que desciende prácticamente a la mitad, 0,26 Mt/año, en el período 2004-2016.

No se dispone de información sedimentológica que permita caracterizar el sedimento del embalse, por lo que al igual que en Mequinenza, se encuentra en licitación los trabajos para la caracterización adecuada de los sedimentos existentes.

En cuanto al tránsito de sedimentos hacia el curso bajo del Ebro, se estima que en la actualidad la tasa de transporte de sedimentos en suspensión aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Ribarroja y



Flix es de 0,37 Mt/año. Al igual que en el caso anterior, a estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.

En la actualidad todo el material de arrastre de fondo de la cuenca del Ebro aguas arriba de Mequinenza, y de las cuencas de los ríos Cinca y Segre, queda retenido en la cola de los embalses. El único sedimento que sale de Mequinenza es el disuelto, que no tiene ninguna influencia en la dinámica sedimentológica del curso bajo. El único sedimento en suspensión que circula por el Ebro a la altura de Flix, es el no retenido en Ribarroja que se estima en un 60% de las aportaciones conjuntas de las cuencas del Cinca y del Segre.

3.2 La dificultad de movilización de sedimentos en Ribarroja y Mequinenza

Existen ya varias experiencias de movilización de sedimentos en grandes embalses de la cuenca del Ebro, todas ellas han sido operaciones muy complejas y con importantes afecciones ambientales, por lo que cualquier estudio debe considerar la complejidad y efectos ambientales de las posibles actuaciones. En este sentido, los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix llevan almacenando sedimentos desde hace ya más de 60 años, por lo que cualquier actuación debe ser analizada con mucha cautela.

La CHE ha evaluado en el estudio *“Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix”*, la posibilidad de restaurar el tránsito sedimentarios en la zona, llegando a la conclusión de que *“Las únicas alternativas viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix son la retirada mecánica mediante excavación en seco (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix). La viabilidad de la retirada mecánica debe analizarse mediante un estudio económico específico, pero los valores más favorables recopilados en la literatura suponen unos costes muy elevados. Con relación a las medidas de evacuación hidrodinámica, requieren condiciones muy singulares, que no se dan en los embalses del sistema, por lo que las efectividades esperables son muy bajas”*.

La remoción de sedimentos del embalse de Ribarroja mediante una bajada brusca del nivel del embalse (técnica hidrodinámica de lavado) es la actuación más factible, si bien con una efectividad de carácter limitado. Sin embargo, el vaciado del embalse de Ribarroja y el flujo de sedimentos que se generaría aguas abajo puede generar impactos socioeconómicos y medioambientales de gran magnitud, por ejemplo, la posible necesidad de parar las centrales nucleares de Ascó y Vandellós, al dejar de estar operativa la central hidroeléctrica de Ribarroja, que les da respaldo de seguridad.

También se afectaría a los usos recreativos del embalse de Ribarroja basados en la pesca de especies alóctonas y en especial del siluro, se verían dramáticamente dañados y tendrían que esperar varios años para recuperarse, junto con todo el cauce aguas abajo del Ebro.

Por lo tanto, cualquier actuación en este sentido debe estar avalada por estudios científicos, modelación matemática, ensayos y pruebas piloto, de forma que haya un adecuado consenso entre la sociedad sobre las soluciones a implantar.

3.3 El transporte de sedimentos por el río Ebro hasta el delta del Ebro y el papel de la cuenca aguas abajo de Flix

La movilización de los sedimentos en el río Ebro desde el embalse de Flix hasta su llegada al Delta del Ebro debe ser estudiada igualmente con profundidad. Tal y como se ha comentado con anterioridad, es necesario conocer detalladamente el estado del lecho del río tras 60 años sin recibir aportes de

sedimentos gruesos, de forma que puedan realizarse modelos numéricos y ensayos que permitan conocer la capacidad de transporte del río y los tiempos de tránsito del sedimento hasta su llegada al Delta.

Es necesario igualmente estudiar la cuenca aguas abajo de Flix, no solo como una posible fuente de sedimentos, sino también como ensayo piloto de metodologías que puedan aplicarse posteriormente al río Ebro.

Igualmente, es importante el estudio de los azudes y otros obstáculos existentes en el río Ebro y afluentes, para, en su caso, mejorar la continuidad fluvial y favorecer el transporte de sedimentos asociado, de forma que se facilite el tránsito sedimentario y se optimicen los tiempos de llegada de los sedimentos al Delta.

En este sentido, existen ya experiencias positivas, en especial las incluidas en el proyecto Life Ebro ADMICLIM, en el que se han realizado varias pruebas piloto de inyección de sedimento en el tramo final del río Ebro y en la red de canales de riego del Delta, cuyos resultados y experiencias deben ser la base de las acciones futuras.

Por otro lado, las crecidas controladas del río Ebro deben desarrollar un relevante papel en este proceso, como fuente esencial de energía para la movilización del sedimento futuro, pero por el contrario, deben ser compatibles con los usos del suelo y con el equilibrio del lecho del río.

3.4 Plan de actuación previsto y estado de implantación

A partir de la información anteriormente citada, se prevé desarrollar las siguientes actuaciones a ejecutar en los próximos meses:

1. Caracterización cartográfica y sedimentaria de la cuenca aguas abajo de Flix.

Se encuentra ya contratada la realización de los estudios de detalle de la caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Ciurana, Guiamets y Margalef y de sus cauces asociados, como posibles casos piloto para el estudio de la circulación de sedimentos hasta el Delta del Ebro.

Los trabajos se iniciarán durante febrero/marzo de 2021.

2. Cartografía de detalle del eje el Ebro desde Flix hasta el Delta del Ebro.

Igualmente se encuentra ya contratada la realización de la cartografía de detalle del eje del Ebro y la caracterización del estado del lecho del río desde Flix hasta el Delta del Ebro, incluyendo la granulometría y estado del sustrato del río, de forma que se permita tener las herramientas necesarias para desarrollar una adecuada modelización matemática del transporte de sedimentos a lo largo del eje del Ebro y sus afluentes.

Los trabajos se iniciarán durante febrero/marzo de 2021.

3. Cartografía del embalse de Mequinenza y caracterización de sedimentos existentes en Mequinenza y Ribarroja.

Igualmente, en estos momentos está en licitación la realización de una batimetría actualizada de Mequinenza (en Ribarroja recientemente se ha realizado una nueva batimetría por el titular del embalse) y la caracterización del estado de los sedimentos, volumen y granulometría de los embalses de Mequinenza y Ribarroja.

Se espera que los trabajos puedan empezar antes del verano de 2021, con un plazo de ejecución de 6 meses.



4. Modelación hidrodinámica del tránsito de sedimentos desde los 5 embalses estudiados hasta el Delta del Ebro.

Con toda esta información, el CEDEX procederá, con el asesoramiento de distintas universidades y expertos, realizará los estudios hidrodinámicos necesarios para valorar la posibilidad de estudiar con detalle alternativas que permitan mejorar el tránsito sedimentario en el tramo bajo del río Ebro, tanto de la cuenca propia como de los embalses aguas arriba, en función de la mejora del conocimiento científico-técnico, y teniendo en cuenta las potenciales afecciones que puede producir contaminación de los sedimentos en esta zona, considerando además la posibilidad de mejorar el régimen de las crecidas controladas en el río Ebro aguas abajo del embalse de Flix, para controlar la población de macrófitos y mejorar el transporte sólido, así como continuar trabajando para asegurar el adecuado estado de mantenimiento de los desagües de fondo de las presas de la cuenca del Ebro. En estos estudios se tendrán en cuenta de manera especial aquellos trabajos similares que haya realizado con anterioridad la Agencia Catalana del Agua u otros organismos de la Generalitat, garantizando la coordinación necesaria para evitar duplicidades y avanzar sobre el conocimiento y la experiencia existente.

5. Estudio de las barreras transversales existentes en los cauces aguas abajo de Flix y propuesta de proyectos de permeabilización.

Con toda la información cartográfica disponible y con los resultados de la modelación numérica a desarrollar, se realizarán los proyectos constructivos y obras necesarias que permitan una adecuada mejora del tránsito sedimentario, de forma que se minimicen los efectos de las obras transversales existentes.

6. Diseño de un protocolo de gestión de los sedimentos.

A partir de los resultados anteriormente citados, y con todas las experiencias existentes, se procederá a redactar un protocolo de actuación que establezca un marco técnico científico de actuación que permita la mejora del régimen sedimentario del Delta del Ebro. Este protocolo deberá basarse en pruebas y ensayos piloto que permitan buscar metodologías eficaces y que minimicen los efectos económicos y ambientales de estas actuaciones.

7. Creación del Observatorio Hidrológico del Delta del Ebro

Es imprescindible recuperar y mantener un sistema de seguimiento y monitorización de todos los datos hidrológicos del Delta del Ebro, a través de la potenciación de la RIADE y realización de estudios para medir la subsidencia con datos empíricos o a partir de las imágenes de satélite y con ello, dotarnos de herramientas técnico científicas coordinadas entre la Dirección General del Agua, Dirección General de la Costa y el Mar, Puertos del Estado, Confederación Hidrográfica del Ebro, la Generalitat de Cataluña, en especial a través de Agencia Catalana del Agua, que permitan monitorizar la evolución del Delta y el impacto tanto del cambio climático como de las medidas que se van implantando.

En este sentido, la Dirección General del Agua y la Confederación Hidrográfica del Ebro están ya tramitando los siguientes nuevos contratos:

- Nivelación de alta precisión en el Delta del Ebro, ya en fase de adjudicación final, cuyos trabajos esperan iniciarse en primavera de 2021 y servirá para caracterizar adecuadamente el fenómeno de la subsidencia.
- Mejora de la información hidrológica disponible en la Red de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro (RIADE), que se espera licitar antes del verano de 2021.

3.5 Conclusiones

Este plan de actuación para la mejora del régimen sedimentario del Delta del Ebro establece una hoja de ruta que permita, con el mayor soporte científico y social, mejorar el tránsito sedimentario y los aportes de sedimentos al Delta del Ebro.

Estas actuaciones tienen una elevada complejidad técnica y múltiples afecciones sociales y socioeconómicas, por lo que necesitan un importante soporte científico y son complejas de resolver, por lo que se necesita tiempo para lograr un adecuado consenso en la búsqueda de soluciones. La alteración del transporte de sedimentos en los últimos 60 años ha tenido importantes impactos en la zona, pero revertir la situación llevará igualmente un tiempo importante. La movilización de sedimentos de los grandes embalses de la cuenca será compleja y el tiempo de tránsito hasta su llegada al Delta será también lento.

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (trabajando de forma coordinada la DGCM, la DGA, el CEDEX y la CHE) ha elaborado esta hoja de ruta a la vez que ha procedido a la tramitación administrativa de los contratos que permitirán establecer la implantación efectiva de las primeras fases del mismo. De este modo, durante el año 2020 se han preparado diversos contratos con una inversión total del orden de 1,5 M€ (IVA No incluido) que permitirán durante 2021, disponer de las herramientas que permitan consensuar entre todos los agentes implicados las actuaciones conjuntas a desarrollar en el futuro que permitan mejorar este tránsito sedimentario.

4 Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro

4.1 Dinámica litoral del Delta

El estudio de dinámica litoral del Delta comprende tres aspectos fundamentales a la hora de plantear un plan de medidas de protección:

- 1) Estudio los sedimentos: caracterización de fuentes y sumideros
- 2) Transporte longitudinal
- 3) Balance sedimentario

4.1.1 Caracterización de fuentes y sumideros

4.1.1.1 Fuentes sedimentarias

La **principal fuente sedimentaria del tramo de costa en estudio la compone el propio río Ebro** y, ocasionalmente, de forma secundaria la franja litoral aguas arriba. En la actualidad, el río se encuentra regulado en el 97 % de su cuenca, dejando una superficie de cuenca libre, en las proximidades de su desembocadura, de 2.316 Km², lo que ha llevado a **reducir los aportes sólidos del río Ebro considerablemente**.

La Tabla 3 muestra la evolución más reciente de los aportes del río según diversos autores.

Con respecto a los **aportes actuales que el río proporciona al mar** y plataforma del Delta son muy discontinuos. Así, se considera que el aporte medio de arena del río Ebro se encuentra actualmente entre 12.000 y 48.000 m³/año. Por tanto, puede suponerse un **valor característico medio de 30.000 m³/año**. Para las puntas, suponiendo un coeficiente de mayoración de 1,7 se tiene un máximo de 81.600 m³/año, con un valor medio de 51.000 m³/año.

Tabla 3 Evolución reciente de los aportes sólidos (fundamentalmente arenas) del río Ebro al Mar según diversos autores.

Año	Autor	x 10 ⁶ (t/año)	x 10 ⁶ (m ³ /año)
1880	Gorría	25	10
1936	Carreras i Candi	17	6,8
1976-78	PIDU	2	0,8
1990	Nelson	6,2	2,48
1990	Jiménez et al.	0,107-0,263	0,043-0,105

No obstante estas cantidades tan bajas que se producen recientemente, el problema de la fuente de sedimento no radica únicamente en la cantidad que aporta al mar y las playas del Delta, sino también en el sentido de la distribución de este aporte. Como puede apreciarse en la Figura 4, actualmente se produce un **reparto asimétrico de sedimentos en el exterior del Delta** que provoca una descompensación de aportes al norte y sur de la desembocadura. Por tanto, el aporte de sedimentos, especialmente de arena, es totalmente asimétrico; pudiéndose suponer que de las cantidades que aporta el río Ebro **prácticamente la totalidad, o al menos más del 95%, se distribuyen en el hemidelta norte**, especialmente en la isla de San Antonio y proximidades y la punta del Fangar. Si se consideran las proporciones de distribución indicadas (95%-5%) entonces los aportes medios recibidos por el hemidelta norte serían del orden de 28.500 m³/a y al hemidelta sur de 1.500 m³/a.



Figura 4. Movimientos de sedimento observados en la imagen de satélite del 23 de febrero de 2020, una vez que los expulsa el río Ebro, y su distribución asimétrica espacial (Fuente: ICGC)

4.1.1.2 Sumideros de sedimento

Se entiende por sumidero de un sistema litoral aquella zona donde se deposita el sedimento, movido por el transporte sólido litoral, sin posibilidad de que el transporte de sedimentos de nuevo lo pueda mover. En el sistema litoral que forma el Delta del Ebro existen **dos sumideros**, al norte y sur de él, formado por **las bahías del Fangar al norte y los Alfaques al sur** (Figura 5).

La cuantificación del sedimento acumulado en ambos sumideros es imprescindible para conocer y cerrar el balance de sedimentos que discurren anualmente a lo largo de las costas de Delta del Ebro. Para ello, se considera necesario realizar batimetrías y comparar sus estados a lo largo del tiempo, obteniendo así el volumen de sedimento (fango y arena) que se deposita en ellos.

En ninguno de los trabajos que se han analizado se cuantifica este volumen de depósito anual. Por ello, para este Plan se ha utilizado las batimetrías del IHM para caracterizar ambos depósitos. En un primer escalón **se han comparado las batimetrías de ambas bahías en las cartas náuticas de 1878-80 y de 1973-74**. Para dar una mejor visión de conjunto y sus transformaciones en el tiempo se han retocado, gradando con colores las profundidades, y se muestran las correspondientes a la bahía del Fangar en la Figura 6, y las de la bahía de Los Alfaques en la Figura 7.

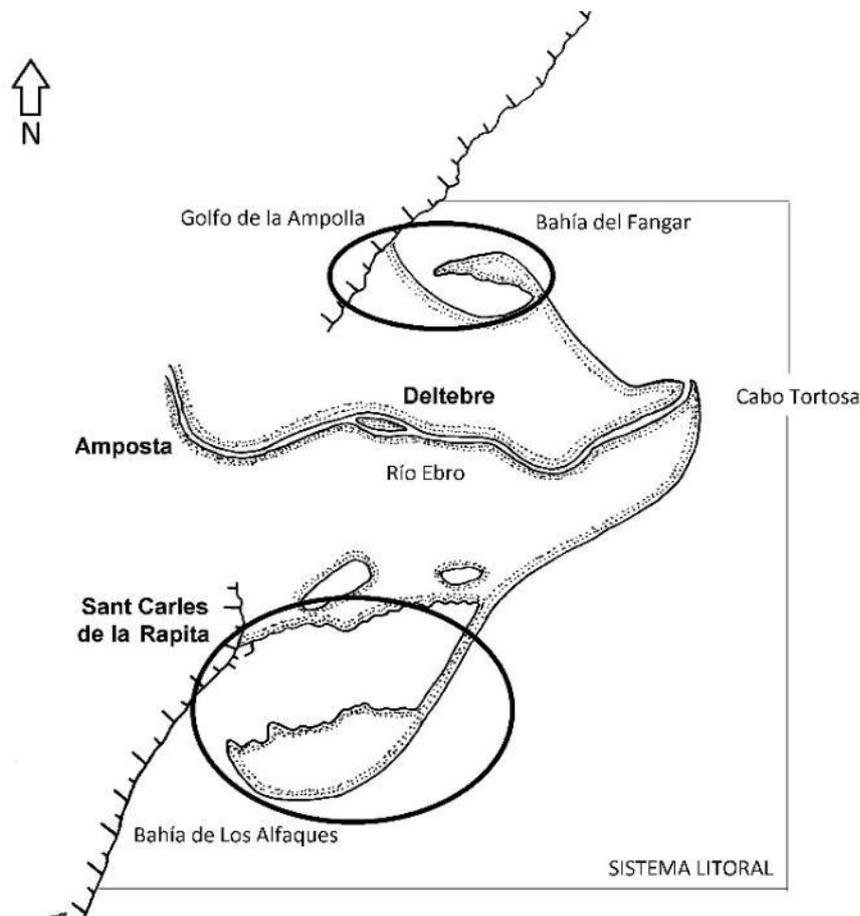


Figura 5. Sumideros de sedimento en el sistema litoral del Delta del Ebro

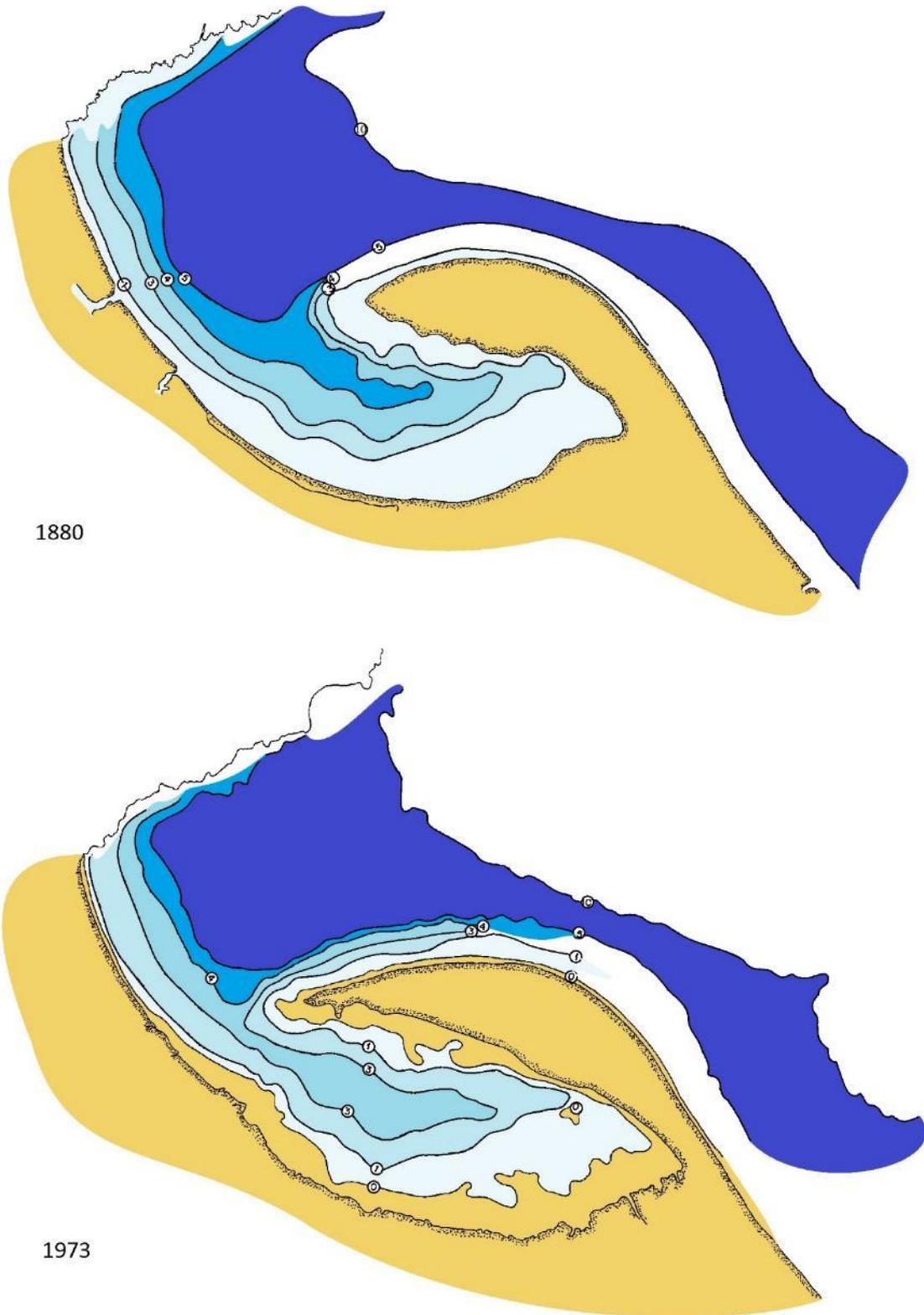


Figura 6. Batimetría de la bahía del Fangar y golfo de la Ampolla en 1880 y 1973 (Fuente: IHM)

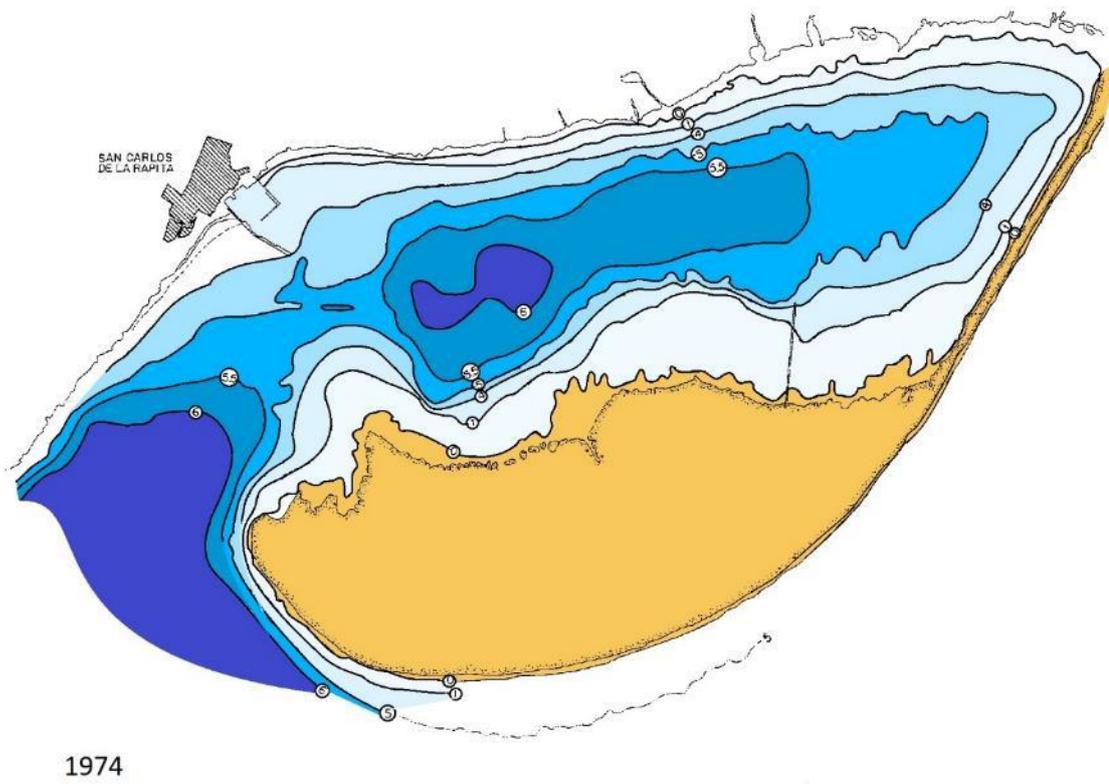
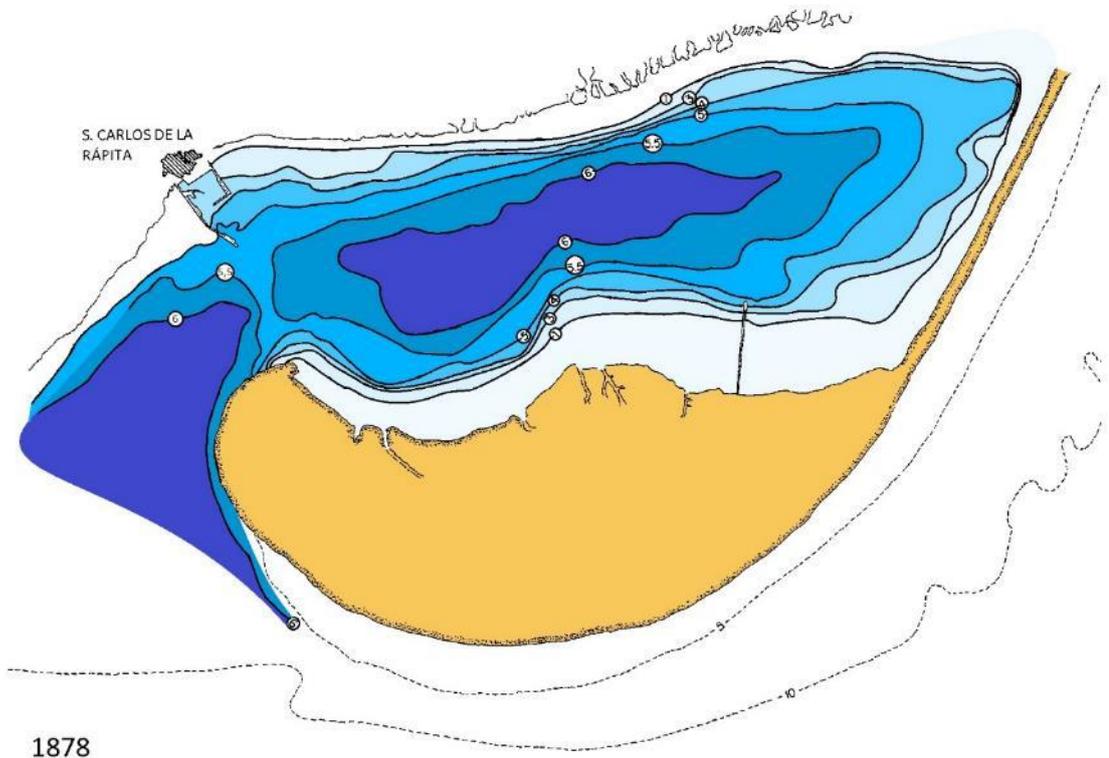


Figura 7. Batimetría de la bahía de los Alfaques en 1878 y 1974 (Fuente: IHM)

El **volumen acumulado en ambas bahías** es aproximadamente:

- Fangar (1880-1973, 93 años): $8,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \Rightarrow 90.300 \text{ m}^3/\text{año}$
- Los Alfaques (1878-1974, 96 años): $26,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \Rightarrow 276.000 \text{ m}^3/\text{año}$

Estas cantidades son muy aproximadas y tendrían que corroborarse con datos más precisos, como nuevas batimetrías específicas; además habría que complementarlo con los datos que suministraría la comparación de la batimetría de 1973-74 con la actual de 2019.

4.1.2 Transporte longitudinal de sedimentos

Como se ha podido apreciar en los apartados anteriores, la caracterización del **transporte de sedimentos a lo largo de la costa del Delta del Ebro** está perfectamente realizada; el problema aparece cuando se analizan todos estos datos ya que, aparte de haberse determinado por dos vías distintas, con conceptos (capacidad de transporte y transporte real) diferentes, la disparidad de los datos hace que se tenga que tomar algún criterio que los englobe. Por ello, ha parecido más conveniente elegir los puntos más característicos de esta costa y determinar para ellos los **valores máximo y mínimo** que dan los diversos estudios y calcular el **valor promedio**. El resultado se muestra en la Figura 8 y en la Tabla 4.



Figura 8. Resumen del transporte de sedimentos a lo largo de las playas del Delta del Ebro (Foto: Google Earth)

Tabla 4 Resumen del transporte de sedimentos a lo largo de las playas del Delta del Ebro (m³/año)

Zona	Máximo	Mínimo	Media
1- Extremo Fangar	333.000	25.000	120.000
2- Fangar	550.000	45.000	142.000
3- Playa Marquesa	125.000	17.000	57.000
4- Riumar	240.000	-206.000	52.000
5- Desembocadura	255.000	30.000	117.000
6- Cabo Tortosa	104.000	-90.952	8.500
7- Isla de Buda	-724.000	-105.000	-237.600
8- Eucaliptus	-870.000	-55.000	-198.000
9- Trabucador norte	-480.000	-11.000	-139.600
10- Trabucador	-470.000	-5.989	-180.000
11- Trabucador trans.	30.000	16.000	23.000
12- La Banya	-692.000	-48.000	-210.000
13- La Banya Sur	-895.000	-82.874	-295.000
14- La Banya final	-595.000	0	-154.000

Este transporte a lo largo de la costa, junto al que se produce transversalmente, es el responsable de las transformaciones que se van produciendo en las playas que forman la costa del delta del Ebro.

Los valores calculados del transporte de sedimentos a lo largo de la costa tienen en cada punto una horquilla muy grande en gran parte de los casos, por lo que existe una elevada incertidumbre. En conclusión, la información es más cualitativa que cuantitativa.

4.1.3 Balance sedimentario

Finalmente, para poder realizar un análisis correcto de este balance sedimentario, calculado por los dos métodos indicados, que son complementarios, se ha generado dos tablas que se muestran a continuación. En primer lugar, la Tabla 5 resume los resultados del balance sedimentario de los seis trabajos considerados y el realizado en el marco de este Plan (ver Anejo 5).

Tabla 5. Resumen del Balance Sedimentario en el Delta del Ebro (m³/año)

Estudio	Hemidelta norte	Hemidelta sur	Fuente	Sumidero		TOTAL
				Fangar	Alfaques	
GENCAT (1991)	-123.000	-287.000				-410.000
Guillen (1992)	-415.000	-1.191.900				-1.566.050
Jiménez y Sánchez-Arcilla (1993)	0/-30.000	0	0/30.000		16.000	-16.000/-46.000
LIM-UB (2000)	0	0		63.000	16.000	-79.000
GENCAT (2008)	-8.000	-102.000				-110.000
LIM (2011)	-73.000	-358.000				-432.500
CEDEX (2020)			30.000	30.000	150.000	-150.000

En la segunda (Tabla 6) se resume el balance sedimentario calculado en este trabajo por periodos; que ayudará a entender la variación que se produce de él a lo largo del tiempo.

Tabla 6. Resumen del Balance sedimentario del CEDEX (2020) por periodos (m³/año)

Periodo	TOTAL	Fuente	Sumidero (Exceso)
1957-2018	-150.100	30.000	180.100 (0)
1984-2018	-150.000	30.000	180.000 (0)
1994-2018	-397.480	30.000	366.000 (61.480)
2004-2018	-379.796	30.000	366.000 (43.796)
2015-2018	-489.060	30.000	366.000 (153.000)

De estas tablas se puede extraer que los balances sedimentarios de GENCAT (1991), LIM (2011) y CEDEX (2020), en el último periodo, son similares. Los datos obtenidos en la tesis de Guillén (1992) son excesivos, pudiendo corresponder a un estado momentáneo evolutivo por lo que podría representar picos.

La Tabla 6 muestra una variación al alza de las pérdidas de sedimento a lo largo del tiempo; con un máximo en el periodo 2015-18, que corresponden con los valores dados por el LIM (2011).

En conclusión, de ambas tablas se desprende que **existe un déficit de sedimentos en la costa del Delta que se situaría en una horquilla entre 180.000 y 519.000 m³/año**; con una distribución que tendría una relación Hemidelta norte/Hemidelta sur de: $92/276 = 1/3$. Por lo que la horquilla de pérdidas se situaría:

-45.000 a 130.000 m³/año (hemidelta norte)

-135.000 a 389.000 m³/año (hemidelta sur)

4.1.4 Comportamiento general del Delta del Ebro

El comportamiento general del Delta obedece a la adaptación y respuesta sedimentaria de este tipo de estructuras. Un delta es una acumulación de sedimento que proveniente de un cauce, el mar no es capaz de redistribuir a lo largo de la costa; esta situación se fue dando hasta que los agentes suministradores de estos sedimentos cambiaron; debido a la regulación del cauce mediante presas, urbanización y reducción de la escorrentía de la cuenca, etc. Pero la acción del mar ha seguido actuando sobre él y los sedimentos que redistribuye provienen una pequeña parte del propio río y otra del propio Delta: lo que provoca una erosión continuada de la boca de salida del río, cuya salida ha cambiado al reducirse su energía hidrodinámica respecto a la marina provocando descompensaciones en el movimiento de sedimentos a lo largo de sus costas, y una continua sedimentación en las bahías del Fangar y los Alfaques. Este estado de transformación hace que se produzcan zonas erosivas importantes (playa de la Marquesa en el norte, Isla de Buda en la boca y Trabucador en el sur) y acumulativas igual de importantes (Fangar en el norte, y Eucaliptus y los Alfaques en el sur).

4.2 Efectos del cambio climático

4.2.1 Proyección de variables climáticas marinas en el Delta del Ebro

Para la evaluación de los efectos del cambio climático en el Delta del Ebro se ha considerado la **información sobre proyecciones** proporcionada por el visor <http://www.c3e.ihcantabria.com> (accedido online: 29-05-2020). La descripción sobre la obtención de los datos que aparecen en el visor se puede

encontrar en el informe realizado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria por encargo del Ministerio para la Transición Ecológica (IH Cantabria-MITECO, 2019²).

Se han considerado tanto las variables relativas a **nivel del mar y oleaje**, por ser las que más influyen en la costa en estudio. Se han analizado mediante el citado visor las proyecciones de cada variable marina en los nodos más cercanos a los hemideltas norte y sur del dominio “costa” (Figura 9), recogiendo los valores medios y sus intervalos de confianza para cada periodo y escenario de emisiones considerado.



Figura 9. Localización de los nodos para proyecciones climáticas marinas en el Delta del Ebro (Fuente: MITERD, 2019)

En cuanto a los escenarios considerados, se han considerado dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, denominados RCP4.5 (escenario medio de emisiones) y RCP8.5 (escenario pesimista) por el 5º informe IPCC. Lógicamente, las previsiones de próximos informes deberán matizar o corregir lo indicado en este Plan en la medida que sea necesario.

A continuación se exponen los principales resultados de este análisis.

Las **variaciones más significativas se producen en el nivel del mar**, cuya caracterización se ha realizado considerando las siguientes variables: 1) Nivel Medio del Mar sin oleaje (*MSL – Mean Sea Level*, por sus siglas en inglés); 2) percentil del 99,9% de la marea meteorológica (*MM_{99,9%}*).

En el citado visor no se disponen de datos medios para el periodo de control, aunque sí se dan los valores medios y los intervalos de confianza para las proyecciones en cada uno de los periodos bajo ambos

2

https://www.adaptecca.es/sites/default/files/documentos/2019_metodologia_y_bbdd_proyeccion_impactos_de_cc_costa_espanola.pdf

escenarios, recogidos en la Tabla 7 (para el corto-medio plazo, periodo 2026-2045) y la Tabla 8 para el largo plazo (periodo 2081-2100).

De los resultados referentes al nivel del mar en las zonas de estudio se observa que las variaciones serían muy similares, alrededor de los 15 cm de aumento, para ambos escenarios en el corto-medio plazo. En el periodo a largo plazo el máximo aumento sería de unos 58 cm en el escenario de estabilización y se podría alcanzar hasta 78 cm de incremento en la zona para el escenario pesimista. La marea meteorológica muestra reducciones casi imperceptibles, del orden de los 2-5 cm, en todos los periodos y escenarios.

Tabla 7. Variación media y límites inferior y superior del intervalo de confianza para el nivel del mar a corto-medio plazo y cada escenario en el Delta del Ebro (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)

Periodo	2026-2045					
	RCP4.5			RCP8.5		
	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
MSL (m)	0.15	0.14	↑ 0.16	0.16	0.15	↑ 0.17
MM_{99,9%} (m)	-0.03	↓ -0.04	-0.02	-0.01	↓ -0.04	0.02

Tabla 8. Variación media y límites inferior y superior del intervalo de confianza para el nivel del mar a largo plazo y cada escenario en hemidelta norte (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)

Periodo	2081-2100					
	RCP4.5			RCP8.5		
	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
MSL (m)	0.43	0.28	↑ 0.58	0.58	0.39	↑ 0.78
MM_{99,9%} (m)	-0.02	↓ -0.04	0.00	-0.05	↓ -0.07	-0.03

Los valores obtenidos de las variables de oleaje se muestran en las siguientes tablas; que son los valores medios para el periodo de control, las variaciones respecto a dicho periodo ($\Delta(1985-2005)$), y los límites inferior y superior del intervalo de confianza ([IC5%], [IC95%]). Esta nomenclatura, así como el uso de flechas verticales de sentido opuesto para los aumentos por encima del umbral representativo del 25 % superior y por debajo del 25% inferior de los valores, es la misma de las dos tablas anteriores.

Las variables que se representan la dinámica del oleaje consisten en: 1) valor medio de la altura de ola significativa ($H_{s,m}$); 2) percentil del 99,9% de la altura de ola significativa ($H_{s,99,9\%}$); 3) valor medio de la dirección de oleaje (Dir); 4) valor medio del periodo de pico (T_p); y 5) percentil del 99,9% del periodo de pico ($T_{p,99,9\%}$).

Tabla 9. Valores medios de las variables de oleaje en el periodo de control y variaciones medias e intervalos de confianza en los periodos actual y a corto-medio plazo en escenarios futuros para el Delta (zona Norte) (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)

Periodo	1985-2005	2026-2045							
		Escenario	Actual	RCP4.5			RCP8.5		
				$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
$H_{s,m}$ (m)	0.2475	-0.0042	-0.0139	0.0056	-0.0002	-0.0052	0.0049		
$H_{s,99.9\%}$ (m)	1.122	-0.0106	-0.0325	0.0113	-0.0056	-0.0315	0.0203		
Dir (°)	77.439	↑ 1.1077	↓ -0.3012	↑ 2.5166	↑ 0.5859	↓ -0.0818	↑ 1.2536		
$T_{p,m}$ (s)	5.0785	-0.0100	-0.0333	0.0132	0.0168	-0.0436	0.0773		
$T_{p,99.9\%}$ (s)	11.236	-0.0468	↓ -0.2057	0.1122	0.0534	↓ -0.1886	0.2953		

Tabla 10. Valores medios de las variables de oleaje en el periodo de control y variaciones medias e intervalos de confianza en los periodos actual y a largo plazo en escenarios futuros para el hemidelta norte (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)

Periodo	1985-2005	2081-2100							
		Escenario	Actual	RCP4.5			RCP8.5		
				$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
$H_{s,m}$ (m)	0.2475	-0.0082	-0.0148	-0.0016	-0.0106	-0.0159	-0.0053		
$H_{s,99.9\%}$ (m)	1.122	-0.0078	-0.0354	0.0197	-0.0036	-0.0311	0.0238		
Dir (°)	77.439	↑ 1.6856	0.2037	↑ 3.1676	3.0747	1.5503	↑ 4.5991		
$T_{p,m}$ (s)	5.0785	-0.0273	-0.0686	0.0140	-0.0553	↓ -0.1056	-0.0050		
$T_{p,99.9\%}$ (s)	11.236	↓ -0.1156	↓ -0.3664	0.1351	↓ -0.2501	↓ -0.4190	-0.0813		

En resumen, teniendo en cuenta estos resultados, se puede indicar que el régimen medio no presenta variaciones significativas y en régimen de máximos (percentiles del 99%, que no pueden considerarse como eventos extremos) la altura de ola podría verse incluso reducida, aunque existe una incertidumbre no despreciable en los resultados, con límites de confianza del orden de los dm tanto de reducción como de incremento. Por otro lado, la otra variable que podría tener incidencia en la costa debido al cambio climático es la dirección media del oleaje, que podría verse modificada hasta los 5°, con consecuencias sobre el transporte de sedimentos y la morfología de las playas.

En conclusión, **el principal impacto esperado es el relativo a la subida del nivel del mar, que conllevaría tanto el retroceso de la línea de costa como un aumento en la frecuencia y los daños de la inundación** a los terrenos agrícolas y urbanizaciones aledañas así como la rotura de las barras de Trabucador e Illa de Buda. Se puede resaltar a este respecto la reducción del periodo de retorno de eventos extremos asociados a alturas significantes de ola y mareas meteorológicas que en la actualidad serían considerados regímenes medios, por la adición de la componente de la subida del nivel medio del mar al nivel total incidente en la zona.

4.2.2 Efectos de la subida del nivel del mar sobre el Delta

Para estos dos escenarios, se ha estimado el retroceso de la línea de orilla en playa, para los años 2040, 2060, 2080 y 2100, suponiendo el origen de fechas en 2020. Para ello, se han contemplado dos tipos de playas: 1) Playa abierta de carácter urbano situada en el extremo noroeste del Delta (playa del Arenal);

2) Playas de tipo barrera que se encuentran una al sur del Cabo Tortosa, Illa de Buda, y la otra al sur la barra del Trabucador que forma la barrera de la bahía de los Alfaques (Figura 10).

4.2.2.1 Efectos en la playa urbana de El Arenal

Año 2040: El retroceso se producirá de forma generalizada y homogénea a lo largo de la playa. El retroceso máximo se situaría en torno a 18 m, situado en el extremo sur para el escenario RCP4.5, mientras que para el RCP8.5 la playa pasaría a costa rígida con daños en paseo marítimo y rebases sobre él.

Año 2060: La anchura de playa seca, se vería muy mermada para el escenario de RCP4.5, mientras que para el escenario RCP8.5 los retrocesos se encuentran entre los 55-60 m y desaparecería toda la playa, con lo que se ocuparía el paseo marítimo y la carretera posterior. Para este año ya se observaría la pérdida casi total de la anchura de playa seca, La costa se comportaría como rígida con daños importantes en los paseos marítimos y aumento de rebases e inundaciones en el trasdós.



Figura 10. Zonas de estudio para determinar el retroceso de la costa exterior debido a la subida del nivel del mar, producida por el cambio climático (Foto: IGN)

Año 2080: Para esta situación se observan retrocesos en el rango entre los 76 y 110 m, para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 respectivamente, siendo mayor el retroceso en la zona sur. Los embates del mar harían inviable el paseo marítimo tal y como se encuentra en la actualidad siendo altamente vulnerable el trasdós a inundaciones por rebases y alcance del mar.

Año 2100: El retroceso para este horizonte y escenario de emisiones se estima en valores entre los 124 y 171 m según el escenario contemplado, con los problemas asociados de inundación de grandes áreas en la zona e incrementando la vulnerabilidad y problemas indicados en los puntos anteriores.

4.2.2.2 Efectos en las playas tipo barrera

El comportamiento tanto para la Illa de Buda como para la barra del Trabucador es similar en los dos escenarios, aunque el efecto es más profundo en el RCP8.5, escenario pesimista para el cual se han



obtenido los siguientes resultados (ver Figura 11 y Figura 12 para la Illa de Buda y la barra del Trabucador respectivamente):

Año 2040:

Illa de Buda: el retroceso muestra cambios uniformes a lo largo de la barra, con un valor medio en torno a los 20 m.

Trabucador: el retroceso es uniforme en toda la barra, con un valor medio en torno a 24 m, y un máximo de 36 m en el extremo sur.

Año 2060:

Illa de Buda: en este horizonte temporal se puede apreciar, como en el escenario anterior, un retroceso menor hacia el tramo medio de la playa. Los valores medios están alrededor de los 48 m mientras que el máximo retroceso es de unos 64 m.

Trabucador: el retroceso sigue siendo casi uniforme el valor medio de la regresión, de unos 57 m, y aumenta hasta los 87 m en la zona más cercana a la Punta de la Banyà.

Año 2080:

Illa de Buda: Como ocurría en el escenario anterior para el mismo año, el retroceso es bastante mayor en el extremo norte, donde podría alcanzar los 179 m, mientras que la media a lo largo de la playa es de 134 m.

Trabucador: se aprecia una media del desplazamiento de la barra de alrededor de 159 m, aunque en el extremo sur se pueden alcanzar los 230 m, del orden de los efectos esperados en el año 2100 para el escenario anterior, lo que supone una aceleración de los impactos, quedando muy debilitada la barra, que solamente emergerá en periodos de calma.

Año 2100:

Illa de Buda: Los valores medios del desplazamiento de la barra son del orden de los 209 m, siendo el máximo en la zona norte de unos 278 m. Por lo que se esperarían efectos de cambios de orientación de la orilla, con impactos derivados en el transporte de sedimentos y los fenómenos de erosión. Esto influiría también en la forma de la desembocadura y tendría un impacto muy significativo en la laguna Calaix Gran. Es posible que los continuos rebases haya hecho que la laguna haya evolucionado a un marjal; pudiendo haber cambiado el comportamiento de la playa (Illa de Buda).

Trabucador: la media del desplazamiento en este año para la barra es de aproximadamente 246 m, siendo el valor máximo de dicho desplazamiento significativamente mayor, del orden de los 358 m, lo cual implicaría importantes modificaciones en la zona, con las consecuencias derivadas de ello sobre el régimen sedimentario y los usos del terreno. Se considera muy probable que, llegado a este punto, la estructura morfológica podría verse alterada significativamente, llegando incluso a desaparecer tal como se conoce actualmente.

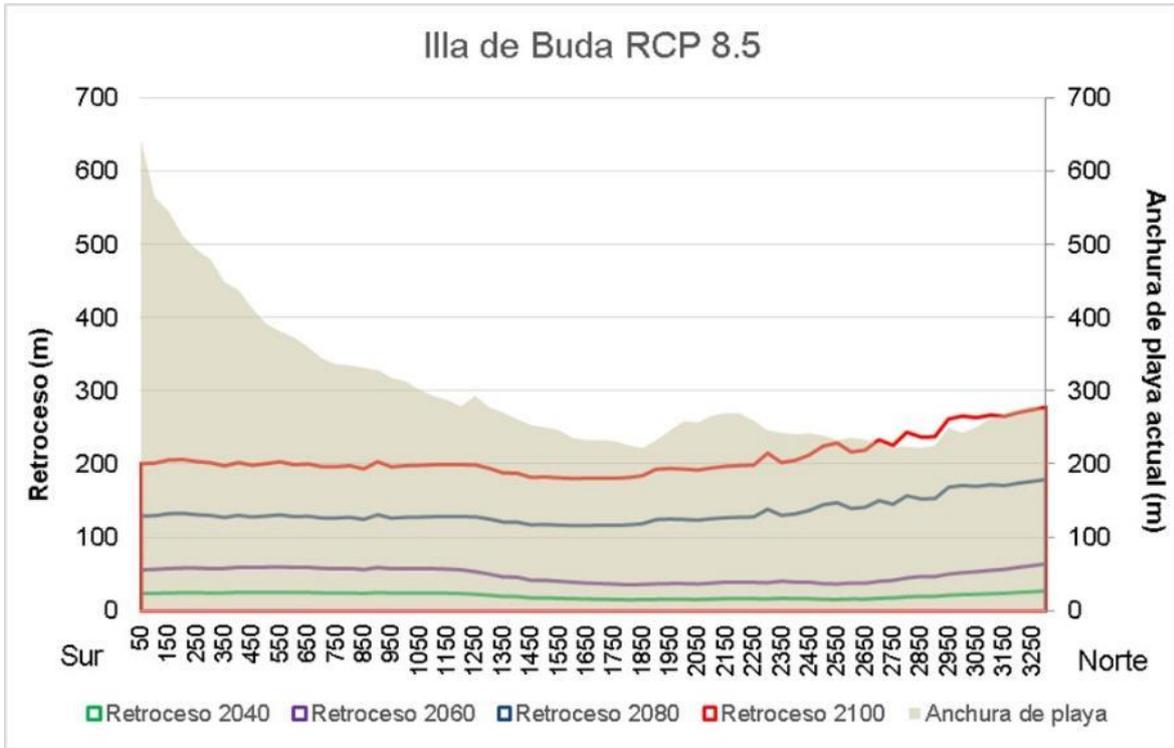


Figura 11. Anchura de playa y retroceso estimado en metros en 2040, 2060, 2080 y 2100 para el escenario RCP8.5 en la playa de Illa de Buda

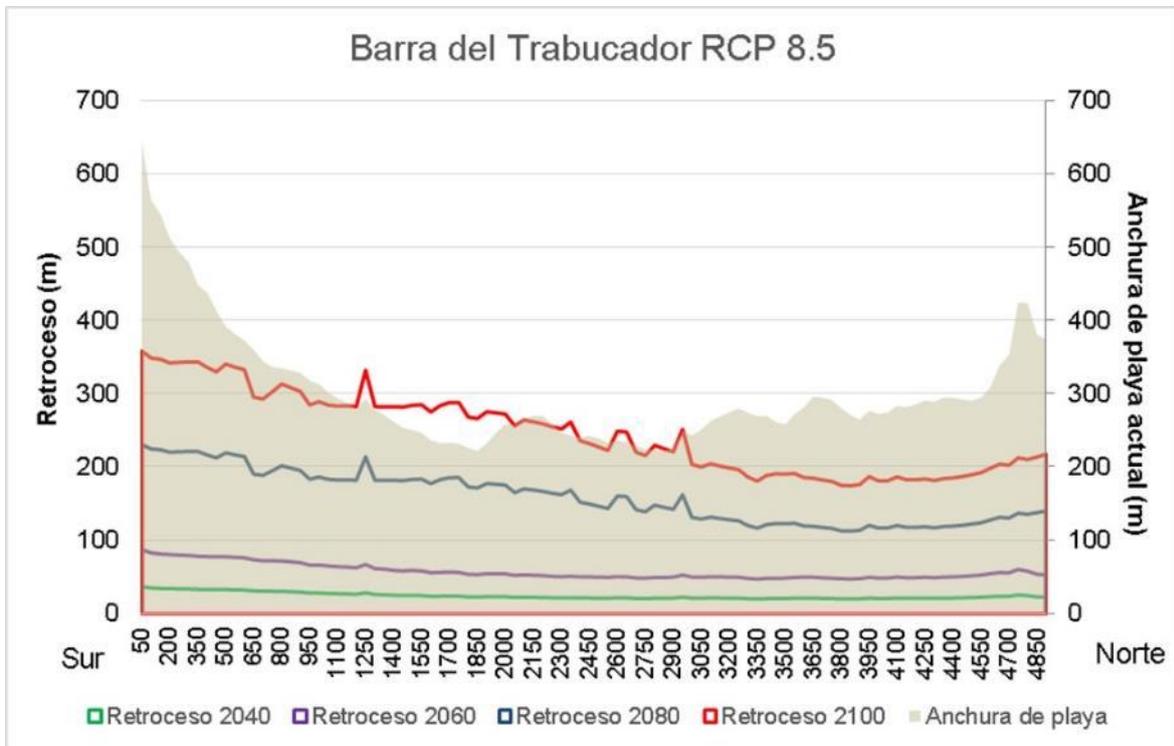


Figura 12. Anchura de playa y retroceso estimado en metros en 2040, 2060, 2080 y 2100 para el escenario RCP8.5 en la playa del Trabucador

4.2.3 Alternativas generales de adaptación

Una vez analizados los efectos de la subida del nivel del mar en una costa abierta, el siguiente paso es conocer los sistemas de protección con que contamos para aminorarlos dentro de las tres estrategias que se nos presentan. Estos son, siguiendo la “Estrategia de Adaptación al Cambio Climático” de la DGCM:

- 1) Acomodación (se mantiene los elementos pero se modifica sus usos)
- 2) Protección (proteger la zona de riesgo)
- 3) Retroceso (abandono planificado de la zona)

A continuación se resumen las **principales características de estas alternativas genéricas de actuación:**

- 1) La acomodación conlleva el cambio de usos del trasdós, que en determinadas condiciones pueden realizarse.
- 2) La protección implica reducir los efectos negativos que se producen con el cambio climático, pero debe tenerse en cuenta que este tipo de soluciones puede paliar el problema pero no actúan sobre las causas, por lo que es probable que el problema, aun siendo menor, persista. En otras ocasiones, incluso podría contribuir a empeorarlo, como por ejemplo en caso de producirse un fallo de las defensas frente a inundaciones, si estas limitaran la capacidad de drenaje de la inundación.
- 3) El retroceso o retranqueo en todos los casos obligaría a las entidades locales y autonómicas a la modificación de planes generales, etc. Para que, como indica la norma, fuese un abandono planificado de la zona.

4.3 Tipos de actuaciones y sus condicionantes

4.3.1 Problemas del Delta

Los problemas actuales detectados a lo largo de las costas del Delta, y que en su mayoría describen los principales estudios realizados recientemente, se pueden subdividir según afecte de manera global al sistema litoral o de manera parcial a alguna de sus zonas. Siendo éstos:

4.3.1.1 Problemas globales

- Falta de aportes de sedimentos por parte del río lo que lleva a un déficit sedimentario y a la **aparición de zonas en estado erosivo casi permanente**. Siendo especialmente importante en las playas de la Marquesa y Riumar, Illa de Buda y barra del Trabucador.
- Descompensación sedimentaria debido a que la desembocadura se encuentra dirigida hacia el norte; esto hace que prácticamente nada de sedimento se incorpore al transporte sólido litoral en el hemidelta sur, lo que **incrementa el problema erosivo en las playas de Illa de Buda y Trabucador**.
- Falta de regulación y control de los sumideros y sus agentes lo que lleva a no conocer, por ejemplo, los efectos que producen los dragados en la zona sur de los Alfaques (apartado 4.3.4 y Figura 4.65), o la capacidad de llenado de las dos bahías (Figuras 4.19, 4.20 y 4.22).
- Inundación de la plataforma deltaica producida especialmente en los temporales y agravada por la subida del nivel del mar (Figura 2.85). Estos problemas son especialmente importantes en la playa de la Marquesa y Riumar, laguna de la Alfacada o Illa de Buda, laguna de la Tancada, barra del Trabucador y zonas interiores de la bahía de los Alfaques.



4.3.1.2 Problemas parciales

- Ordenación de las playas y sus servicios como aparcamientos o chiringuitos de playa, que sean compatibles con la protección y situación medioambiental del entono del Delta.
- Ocupación urbana de la franja litoral más próxima al mar y humedales inundables, hallándose en la playa de la Marquesa, Riumar, bahía del Fangar, Garxal o en la franja costera de la Platjola y Tancada.
- Ocupaciones agrarias que se sitúan en una gran parte de la llanura deltaica, especialmente arrozales, y que pueden verse afectados por las transformaciones que se producen en ella y, a su vez, pueden ejercer de elemento de presión sobre la libre evolución de las playas.
- Ocupación de actividad salinera en la península de la Banyà que obliga a mantener una serie de servicios esenciales como son el suministro eléctrico (cable submarino) y tránsito rodado a través de la barra del Trabucador.
- Vertido de fangos orgánicos provenientes del drenaje de la llanura deltaica y de su actividad agraria que producen estados de eutrofización de las bahías del Fangar y los Alfaques.
- Estado medioambiental de las lagunas con presiones tanto de intrusión salina como debido a la actividad agraria que lleva a un deterioro medioambiental, como sucede en la Platjola.
- Sensibilidad ecológica de las bahías y presión sobre ellas que hace que los aportes de agua continental sea fundamental para preservar su estado especialmente importante en la bahía del Fangar que es la de menor superficie.

Para abordarlos, se analizan tanto los valores de aportes de sedimentos actuales, como la forma de distribución a lo largo de las costas del Delta y el balance sedimentario en ellas tanto la variación a lo largo del tiempo como en un año medio. Estos estudios comprenden los capítulos 3 y 4 del Anejo 5.

El análisis del efecto del cambio climático sobre las costas y la llanura deltaica se analiza en el capítulo 5 del Anejo 5, cuyas conclusiones más significativas se presentan en el apartado “Efectos del cambio climático” de este Plan.

Antes de plantear cualquier tipo de actuación sobre las costas del delta, se han analizado los diferentes tipos de actuación que se tiene como alternativas y sus condicionantes; presentándose en el capítulo 6.

4.3.2 Principios y tipos de actuación en el Delta del Ebro

Los principios de actuación se basan en dos pilares: permitir la evolución y procesos naturales costeros inherentes del Delta y asegurar la protección de la estructura deltaica y de los bienes naturales y humanos enraizados en ella.

4.3.2.1 Objetivo de las actuaciones

Cuando se ha tratado de los tipos de alternativas, **la acomodación se presenta como la actuación que mejor se acopla a una dinámica lo más natural posible**; por tanto, cumple las exigencias que se deben dar para solucionar los problemas globales detectados, señalados en el apartado anterior. Sus objetivos se pueden resumir en los puntos siguientes:

1. Acomodarse al cambio y sus agentes: para lo cual caben dos posibilidades:
 - Dejando actuar a los procesos: evolución natural libre, y adaptándose a ellos sin abandono del Delta
 - Cuando ello sea posible o se considere necesario para aumentar la eficiencia de la principal actuación propuesta, se podrán revertir los procesos erosivos, recirculando el sedimento en el Delta, llevándolo desde las zonas en acreción a las zonas en erosión.

2. Evitar defensas costeras rígidas (espigones, muros, etc.).
3. Las acciones estén encaminadas a evitar y eliminar en lo posible la descompensación sedimentaria entre el Hemidelta norte y el Hemidelta sur.
4. Protección transversal frente a la inundación; garantizando una cota de berma, duna o frente costero que evite los rebases de oleaje, teniendo en cuenta la previsión de la subida del nivel del mar y la subsidencia natural del frente deltaico.
5. Protección frente a las erosiones que pongan en peligro tanto a personas, como bienes y unidades morfológicas de interés natural.
6. Garantizar el mantenimiento de la actividad económica, en muchos casos deberá adaptarse a la nueva realidad.

4.3.2.2 Necesidades

Las propuestas de actuación están encaminadas a solucionar una serie de problemas indicados anteriormente, para lo cual es necesario realizar una serie de acciones:

1. Control de salida de sedimentos: Sabiendo tanto los que aporta el río Ebro como los que pueden obtenerse tanto dentro como fuera del sistema litoral. Es muy importante desde este punto de vista el conocimiento de la capacidad aportadora de la cuenca baja del río Ebro no regulada.
2. Control de sumideros: Es necesario conocer cuánta cantidad de sedimento, en especial arena, se deposita en las bahías del Fangar-L'Ampolla y Alfaques, y cuánto es atrapado por los canales de navegación de Alcanar y San Carles de la Rápita. Esto ayudaría a conocer con mayor exactitud la circulación de arena en el sistema litoral del Delta; pero, además, debe realizarse un control para que, antes de entrar en estos grandes sumideros, se los pueda atrapar, impidiendo que lleguen allí.
3. Control de la línea de costa: Las transformaciones que se producen a lo largo de las costas del Delta dan indicación de los lugares donde se están produciendo erosiones y acumulaciones, y en qué medida se hacen. Este control debe ser objeto de un seguimiento continuo que haga conocer estas variaciones anuales como las fluctuaciones estacionales y las que se producen en eventos extraordinarios como temporales.
4. Control de la franja activa litoral del Delta: La evolución natural de las playas del Delta hace que se tenga previsto una fluctuación de la franja activa de costa que se debe determinar inicialmente para ajustar las líneas del DPMT y de Servidumbre de protección si la citada fluctuación sobrepasase esos límites.

4.3.2.3 Formas de trabajo que pueden incluir las propuestas

Las bases de la propuesta de las acciones o actuaciones que deben emprenderse a lo largo de las costas de Delta del Ebro son las siguientes:

1. **Permitir una evolución natural de la costa del Delta y reservar para ello una franja litoral libre cuya anchura dependerá de las otras acciones que se emprendan conjuntamente.** La base técnica es la misma expuesta en las propuestas de actuación del LIM (2011) y LIM (2018), y Galofré *et al.* 2012.
2. Incremento de la cota en la zona de dominio público para reducir la intrusión marina en la llanura deltaica en eventos especiales; debiendo considerarse la subida del nivel del mar y la subsidencia del terreno.
3. Recircular el sedimento: Adicionalmente, se usarán las zonas de depósito como elemento frontera para revertir los transportes longitudinales, con el fin de reducir la tasa erosiva de los tramos de costa. Para ello se debe:



- a. Controlar las zonas de depósito y su avance anual, mediante un seguimiento de las mismas.
 - b. Impedir que el sedimento (fracción de arena) penetre en la zona de bahías y se mezcle con la fracción más fina de fangos.
 - c. Definir las zonas de erosión y depósito, y realizar en ellas trasvases periódicos.
 - d. Conocer si es necesario complementar con un trasvase desde los sumideros hacia las fuentes y/o desde el hemidelta norte (excedentario) hacia el hemidelta sur (deficitario).
4. Controlar los procesos naturales en dirección transversal a la costa: especialmente en las playas barrera donde el ataque de los temporales arrastra y deposita el material en aguas someras de las bahías interiores sin posibilidad de recuperación en la costa exterior de forma natural. Podría ser útil recircular este material mediante trasvases o labores de reperfilado, donde fuere posible.
 5. Control del dragado de los puertos y estudio de la posibilidad de uso del material extraído.

4.3.2.4 Condicionantes de la arena a mover

La cantidad de material que habría que mover dependerá de:

1. Volumen de arena anual, o del periodo a determinar, depositada y erosionada a lo largo de la costa del Delta.
2. Cuando el Hemidelta norte tenga un balance positivo, el excedente puede ser trasvasado al Hemidelta sur.
3. **Las cantidades previsibles a mover serán las que da el balance sedimentario, que da una horquilla global situada entre 150.000 y 450.000 m³/año, siendo estas cantidades orientativas.**
4. El material de reperfilado transversal de las bahías y cordones litorales se tomará a medida que lo exija el mantenimiento (por ejemplo: en la barra del Trabucador se hallaría en el entorno de 30.000 a 16.000 m³/año, o lo que es lo mismo entre 5 y 2,5 m³/año metro lineal de playa)

4.3.2.5 Obras auxiliares

La gestión del sedimento mediante trasvases puede exigir que se impida la entrada de una parte importante de la arena a las bahías para una mayor eficacia, ya que su recuperación una vez han entrado en ellas puede ser más difícil y costosa. Las alternativas a ello pueden ser varias: zanjas, concavidades, etc.; aunque podrían contemplarse obras auxiliares de retención como diques exentos o espigones, estas no encajan con los objetivos del Plan (punto 2º, "Evitar defensas costeras rígidas"). Por tanto, en su caso, necesitarían de un estudio específico para evaluar su idoneidad y optimizar su diseño.

4.3.2.6 Actuaciones complementarias

Se pueden considerar de dos tipos: Una de ellas corresponde al contorno del territorio y la otra pertenece al seguimiento de las actuaciones.

Respecto al contorno del territorio, caben entre otras consideraciones:

1. Límite y control de las zonas urbanas en el frente costero; especialmente importante en Riumar.
2. Favorecer accesos con movilidad sostenible

En cuanto al seguimiento de las actuaciones ya se ha esbozado en los puntos anteriores, que podría englobarse como seguimiento general:

1. Estudio de la cuenca del río Ebro no regulada, con la capacidad de aportes de arena, etc.
2. Estudio de aprovechamiento de las arenas retenidas en los embalses para cuando hubiera ocasión para ello (obras, desembalses, baja cota de embalses etc.) y su traslado al cabo Tortosa

o la desembocadura del Ebro (consultar el “Plan de Actuación para la mejora de la gestión del régimen sedimentario en el ámbito del Delta del Ebro”).

3. Seguimiento de las actuaciones: Batimetría, perfiles, líneas de orilla, videos y fotos con drones, etc.; contemplando:
 - a. Línea de costa de todo el Delta y batimetría
 - b. Batimetría de los sumideros (bahías de los Alfaques y Fangar-L’Ampolla)
 - c. Control de dragados
 - d. Análisis batimétrico de curso bajo del Río

4.4 Propuesta de actuaciones costeras

4.4.1 Resumen

La propuesta de actuaciones a realizar en la costa del Delta del Ebro tiene como objetivos los expuestos en páginas anteriores. Para ello, las actuaciones propuestas se pueden resumir en los puntos siguientes:

1. Confección de un nuevo deslinde incorporando los terrenos que tengan características de Dominio Público.
2. Realización de una franja de protección que permita el libre movimiento de la costa; son de plena validez las soluciones apuntadas por el LIM (2011) y LIM (2018), si bien debe contemplarse una elevación de la berma que tenga en cuenta los nuevos horizontes de elevación del nivel del mar. Los cálculos justificativos de las anchuras de estas franjas se desarrollan en el apartado 7.3 del Anejo 5 y se resumen en las siguientes figuras: Figura 23 (Sumidero Norte), Figura 24 (Zona 2), Figura 25 (Zona 3), Figura 26 (Zona 4), Figura 27 (Zonas 4 y norte de Zona 5), Figura 28 (Zona 5), Figura 29 (Sumidero Sur).
3. Como actuación adicional, ejecución de cuatro posibles trasvases de arena, dos en cada hemidelta (Figura 30 para el hemidelta Norte y Figura 31 para el hemidelta Sur):
 - I. Punta del Fangar a playas de La Marquesa y Balsa de Arena, hasta el límite erosivo.
 - II. Punta del Fangar y/o Garxal-Riumar a Cabo Tortosa-Illa de Sant Antoni.
 - III. Playa de Eucaliptus a Illa de Buda u Cabo Tortosa.
 - IV. Punta de la Banyà a norte de la playa del Trabucador
4. En caso de realizar la anterior actuación, podría ser conveniente construir diversos elementos de control y retención de arena antes de la entrada en los sumideros (bahías), en la punta del Fangar y la punta de la Banyà. Las alternativas a ello pueden ser varias: zanjas, concavidades, etc; aunque podrían contemplarse obras auxiliares de retención como diques exentos o espigones, uno de los principios de actuación del presente Plan de protección del Delta del Ebro es evitar defensas costeras rígidas. Por tanto, en su caso, necesitarían de un estudio específico para evaluar su necesidad y optimizar su diseño.

4.4.2 Zonificación del Delta del Ebro

Diversos estudios han zonificado la costa de la plataforma deltaica. Todos ellos lo han hecho siguiendo el comportamiento respecto del oleaje centrándose especialmente en la dirección que adquiere la costa. En todos los casos la zonificación resulta muy similar, habiéndose determinado para este Plan de Protección una combinación entre las propuestas de CEDEX (1996), LIM (2011) y LIM (2018), que se muestra en la Figura 13.

Estas zonas corresponden, de norte a sur, a:

S_{norte} = Sumidero norte, bahía del Fangar y L’Ampolla.

Z₁ = Extremo oeste de la península del Fangar.

Z₂ = Extremo este de la península del Fangar y playa de la Marquesa

Z₃ = Playa de Riumar y el Garxal

Z₄ = San Antonio (A) e Isla de Buda (B)

Z₅ = Eucaliptus

Z₆ = Trabucador

Z₇ = Península de la Banyà

S_{sur} = Sumidero sur, bahía de los Alfaques

Existen dos puntos singulares: El primero de ellos es la desembocadura del río -Fuente-, y el segundo es el Cabo Tortosa, cuya antigua desembocadura hace que la costa cambie de dirección y por ello se ha separado el tramo Z₄ en dos; siendo un elemento de transición entre la zona norte y sur del Delta.

Las distintas partes en las que se ha dividido el Delta se muestran en detalle en las siguientes figuras, para el hemidelta norte (Figura 14), desembocadura (Figura 15) y hemidelta sur (Figura 16).



Figura 13. Sistema litoral y zonificación de la costa del Delta del Ebro (Foto: Google Earth)



Figura 14. Partes del Hemidelta norte del Ebro (Foto: Google Earth)



Figura 15. Partes de la desembocadura del río Ebro



Figura 16. Partes del Hemidelta sur del Ebro (Foto: Google Earth)

4.4.3 Desarrollo temporal de las actuaciones

Las propuestas de actuación que se presentan en este Plan persiguen garantizar la estructura exterior del Delta, sin que se produzcan riesgos de inundación, salvo en eventos excepcionales, ni consecuencias negativas a bienes debido a la citada inundación o a los efectos de la erosión producida localmente por un balance sedimentario negativo. Estas actuaciones pueden materializarse con intervenciones muy poco frecuentes (principio de precaución, ver Figura 17) o espaciadas en el tiempo a medida que la costa se aproxime a un umbral de riesgo evidente y no aceptable (Adaptación flexible, Figura 17).

En el presente Plan se ha supuesto que la adaptación se realizará siguiendo el principio de precaución, en un escenario de emisiones pesimista (RCP 8.5) y para el horizonte 2100. Se propone, por tanto, un conjunto de actuaciones poco frecuentes, lo cual hace que tengan una gran magnitud, con anchuras muy amplias especialmente en lo relativo al control del riesgo de erosión costera y retroceso de la línea de orilla como consecuencia de la subida del nivel del mar.

En caso de optar por la adaptación flexible las intervenciones se deben realizar a medida que la erosión se vaya originando y en el mismo grado se produzca la sedimentación en otro punto. De la misma manera, la subida del nivel del mar será progresiva, como lo será el aumento del riesgo asociado a ella y la presión sobre la costa y, con ello, la necesidad de un aumento de franja costera libre que lo permita con un riesgo aceptable. Todo ello implica la realización sistemática de un seguimiento de toda la costa y continuo análisis de los niveles de riesgo existentes. Este seguimiento es esencial también a la hora de determinar las cantidades de arena a reponer mover y verter de un punto a otro de la costa del Delta.

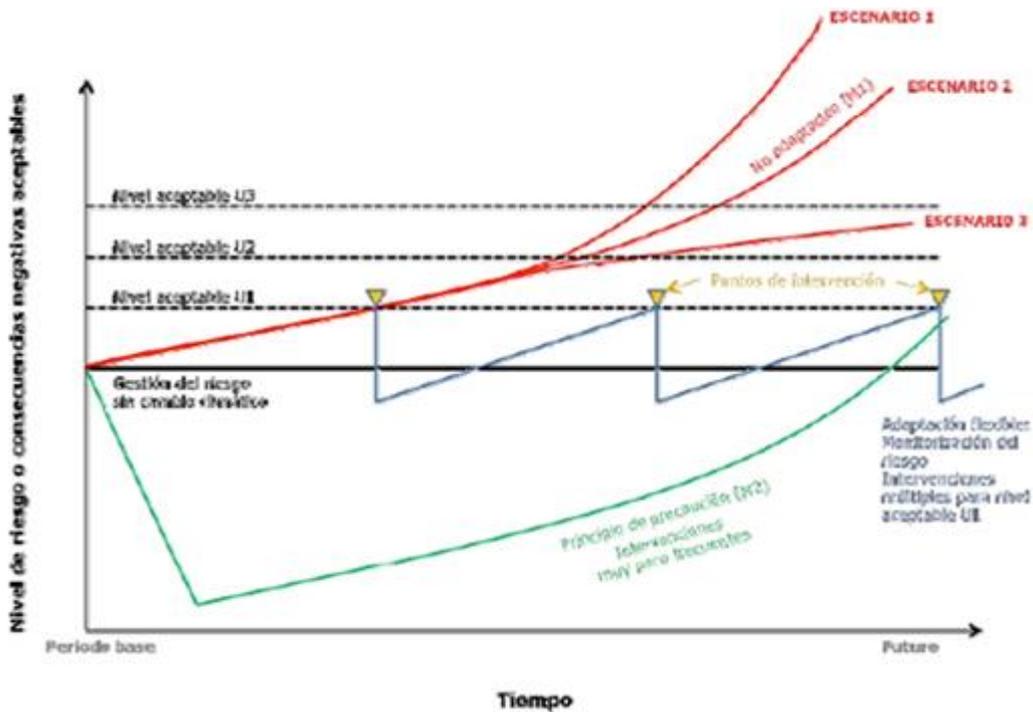


Figura 17. Esquema de las diferentes modalidades de actuación: Principio de precaución vs. Adaptación flexible

4.4.4 Detalle de las actuaciones propuestas

La comparación de los resultados propuestos por el LIM (2011) y LIM (2018) y los obtenidos en los cálculos del Anejo 5 son coherentes, por lo que la franja litoral libre como defensa natural del Delta resulta apta, con las siguientes matizaciones:

Las anchuras de banda del LIM son muy generales, pero se considera necesario detallar más, incluyendo al menos un perfil por cada zona en la que se ha dividido el Delta. Además, se considera necesario aumentar la anchura de estas bandas a medida que se acerca a la punta del Delta, cabo Tortosa, o reducirlas a medida que se acerca a la península del Fangar, en el hemidelta norte, y de igual manera para el hemidelta sur.

Adicionalmente, la anchura de las bandas propuestas podría reducirse si disminuyera el valor de anchura necesaria para contrarrestar la erosión ($\Delta X_{erosion}$, ver Figura 18) para lo cual serían necesarios trasvases periódicos de arena.

Por tanto las actuaciones que se contemplan son:

1. Delimitar el dominio público y crear una **franja de protección costera** libre que permita una evolución natural de la costa; esta banda estaría formada por la actual zona de DPMT y una franja de anchura necesaria para la libre evolución de las playas a adquirir como terrenos públicos.
2. **Adicionalmente, con objeto de controlar dicha evolución, trasvases periódicos de arena** de las zonas de depósito (Fangar, Eucaliptus y Alfaques) hacia las zonas más erosivas (Marquesa, Cabo Tortosa y Trabucador).

4.4.4.1 Creación de una franja de protección costera libre

Esta actuación se contempla **para toda la franja costera del delta, tanto exteriormente como en la costa de las bahías del Fangar y Alfaques**. Se basa y se estructura básicamente en la propuesta en LIM (2011) y LIM (2018) y desarrollada también en otros trabajos como Galofré *et al.* (2012).

La descripción y tipologías de esta banda de protección se presenta y analiza en detalle en el Anejo 5 y su esquema se resume en la Figura 18:

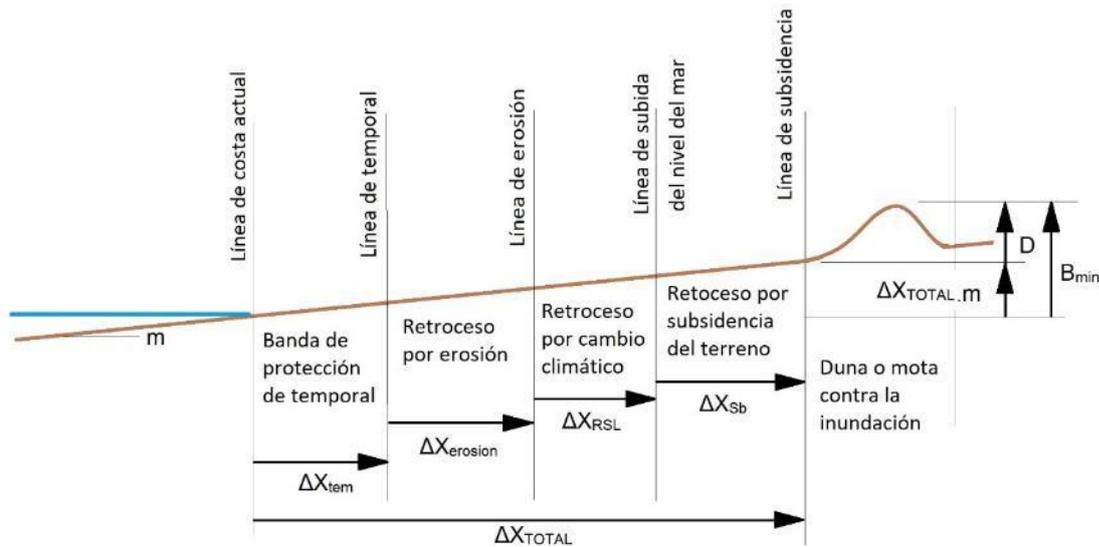


Figura 18. Esquema de perfil tipo de las playas de la llanura deltaica del Ebro

En aquellas zonas del Delta costero donde esta banda de libre movimiento se encuentra sobre terrenos públicos **se considera que no es necesario realizar esta actuación; tal es el caso de las penínsulas del Fangar y Alfaques, o del Garxal, Illas de San Antoni o Buda**.

4.4.4.1.1 Sumidero Norte (S_{Norte}): Playa del Arenal y puerto de Illa del Mar

En esta zona los efectos más importantes son los retrocesos debidos a la subida del nivel del mar y subsidencia; algo menor es el debido a temporales en la playa del Arenal, evaluable, por ejemplo en 30 m; mientras que en el interior de la bahía del Fangar es cero.

Anchura de resguardo, ΔX_{Total} :

- Playa del Arenal: $\Delta X_{Total} = 230$ m
- Interior bahía del Fangar: $\Delta X_{Total} = 200$ m

Altura de berma: $B_{min} = 3,92$ m

Altura de mota o duna: $D = 2,54$ m

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería de 2.371.111 m² (Figura 23).

4.4.4.1.2 Z_1 : Fangar

Toda esta península es un arenal perteneciente al dominio público por lo que **no es necesario realizar banda de protección**. Se produce en ella una gran descompensación, muy visible en el último periodo estudiado de 2015-2018, donde en la punta se observa un crecimiento de 309 m y en el arranque un retroceso de 34 m (Figura 19) que es similar a la tendencia que se ha visto desde 1956 (Figura 20).

La península es totalmente vulnerable con ascensos esperables del nivel del mar y un lugar natural de formación de dunas que desaparecen por arrastre del mar hacia la bahía en estos eventos.

El avance de la flecha, o extremo de la península amenaza con el cierre de la bahía, por lo que este extremo norte sería un lugar apto para dragar, si las condiciones medioambientales lo permiten, periódicamente, evitando en gran medida la colmatación y cierre de la bahía.

4.4.4.1.3 Z_2 : Extremo este de la península del Fangar y playa de la Marquesa

Este tramo lo forman el extremo Este de la península del Fangar, la playa de la Marquesa, la playa de la Balsa de Arena y la playa de Riumar; aunque ésta se analiza en la zona siguiente (Z_3).

Anchura de resguardo, ΔX_{Total} :

- Playa del Fangar: $\Delta X_{\text{Total}} = 0$ m
- Playas de la Marquesa y Balsa de Arena: $\Delta X_{\text{Total}} = 554$ m

Si se efectuase un trasvase entonces la banda de protección se podría estrechar, con un valor mínimo de:

- Playas de la Marquesa y Balsa de Arena: $(\Delta X_{\text{Total}})' > 318$ m

Altura de berma: $B_{\text{min}} = 3,62$ m

Altura de mota o duna: $D > 1,60$ m

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería (Figura 24): 2.158.514 m².

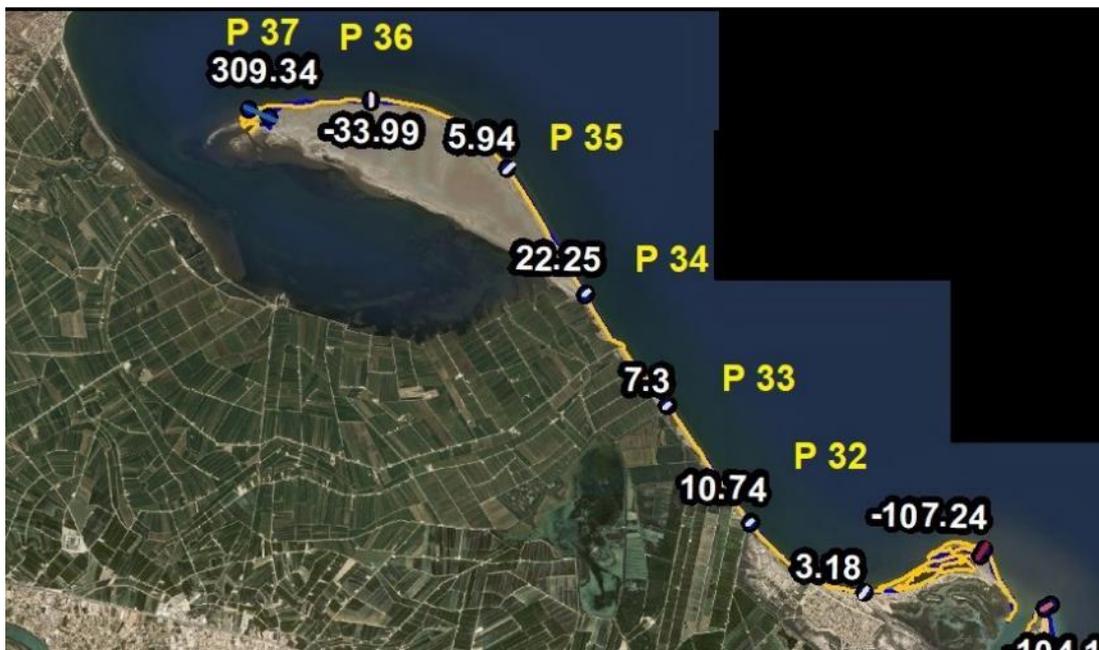


Figura 19. Variación de la línea de costa en el hemidelta norte entre 2015 y 2018 (Foto); en los perfiles usados en LIM (2018) (Foto: PNOA)



Figura 20. Variación de la superficie en el hemidelta norte desde 1956 (Foto) a 2018 (Fuente: IGN)

4.4.4.1.4 Z₃: Playa de Riumar y Garxal

En general esta zona hay crecimiento, aunque en el último periodo se produjo un retroceso, quizás debido a la reordenación de bajos.

La zona del Garxal es pública, por lo que no es necesario realizar banda de protección. No es así en Riumar, donde solamente se consideran avances debido a la subida del nivel del mar, la subsidencia y, en menor medida, los temporales; debido a la protección que le da el Garxal este sumando se ha reducido a la mitad, en una primera aproximación que debe contrastarse con cálculos más precisos.

Así, finalmente se proponen las siguientes anchuras:

Anchura de resguardo, ΔX_{Total} :

- Garxal: $\Delta X_{\text{Total}} = 0$ m
- Riumar: $\Delta X_{\text{Total}} = 264$ m

Altura de berma: $B_{\text{min}} = 3,00$ m

Altura de mota o duna: $D = 1,42$ m

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería (Figura 25): 583.534 m².

4.4.4.1.5 Z₄: Illa de San Antoni (A) e Illa de Buda (B)

Ambos lugares son de titularidad pública, por lo que, en principio no habría que realizar banda de protección; si bien, el retroceso esperado en ellas hace que todo el conjunto tienda a colapsar en el futuro ya que el retroceso medio esperado es de casi 1300 m.

Estas zonas, y en especial la Illa de Buda tiene especial interés medioambiental, albergando una riqueza natural importante a proteger (ver apartado 2), y ello obliga a mantener una franja de protección con una cierta estabilidad en el tiempo, lo que implica la necesidad de una reposición de la arena que pueda erosionarse para evitar que el conjunto colapse.

En la zona sur, tras Illa de Buda, zona conocida como La Alfacada, que formalmente se encuentra en la zona Z_5 al sur de la gola Migjorn, la banda litoral sería:

Anchura de resguardo, ΔX_{Total} :

- La Alfacada: $\Delta X_{\text{Total}} = 560$ m

Si se efectuase un trasvase entonces la banda de protección se podría estrechar, con un valor mínimo de:

- La Alfacada: $(\Delta X_{\text{Total}})' > 318$ m

Altura de berma: $B_{\text{min}} = 3,59$ m

Altura de mota o duna: $D = 1,68$ m

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería (Figura 27): 1.159.913 m².

4.4.4.1.6 Z_5 : *Eucaliptus*

Corresponde a las playas al sur de la: playas del Serrallo, de los Eucaliptus y de L'Aluet. En el último periodo estudiado de 2015 a 2018 el tramo ha experimentado un crecimiento neto, pero con pequeños retrocesos en algunas zonas (Figura 21). Sin embargo, entre 1956 y 2018 se ha comportado como una costa en acreción (Figura 22). Por lo tanto, para analizar las necesidades de una franja de protección se tomará como referencia este periodo más amplio.

La anchura de banda de protección proyectada en esta zona, descontando el tramo norte unos 1.500 m (Alfacada) que se ha diseñado y calculado en el apartado anterior, de unos 8.000 m de longitud sería de 318 m.

Sin embargo, en esta zona se espera un avance de la línea de orilla de al menos 512 m en 2100, superior incluso al ancho de la franja de protección. Además, la anchura media actual de playa en este tramo se encuentra en el entorno de 370 m que excede de la anchura de la banda de protección necesaria en algo más de 50 m.

Si se pensase en el futuro (horizonte de 2100) el avance esperado mínimo sería de 512 m que unido a los 50 m actuales de excedente de banda sería: 562 m lo que supone que se acumularía, como mínimo un volumen potencial en 80 años de: $562 \times 8.000 \times 5,4$ m (profundidad de cierre) = 24.278.400 m³; lo que supondría un excedente anual de: 303.480 m³/año que potencialmente podría usarse como volumen para los trasvases propuestos como posible actuación para el control de la evolución del Delta.

Anchura de resguardo, ΔX_{Total} :

- Eucaliptus: $\Delta X_{\text{Total}} = 318$ m

Altura de berma: $B_{\text{min}} = 3,59$ m

Altura de mota o duna: $D = 1,68$ m

Habría que ajustar las líneas de DPMT en los extremos norte y sur del tramo, pero no en el resto. La superficie que tendría que pasar a dominio público sería (Figura 28): 14.110 m².

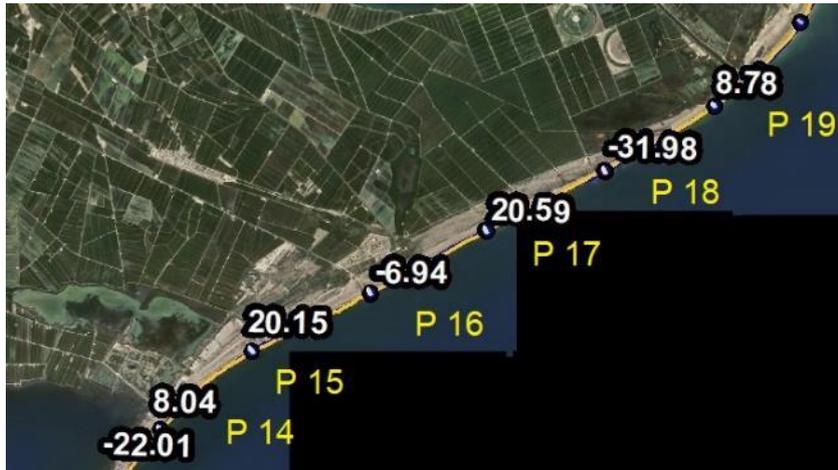


Figura 21. Variación de la línea de costa en la zona de Eucaliptus entre 2015 y 2018 (Foto); en los perfiles usados por el LIM (Figura 4.39) (Foto: PNOA)

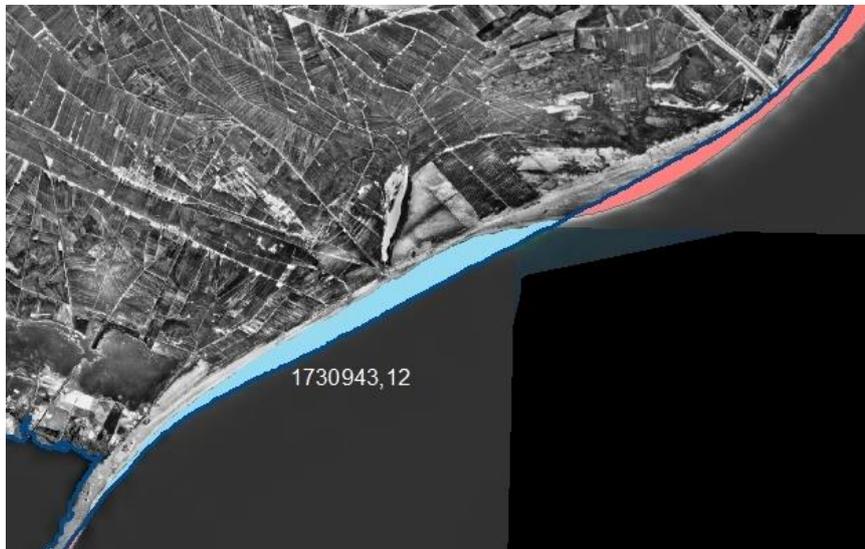


Figura 22. Variación de la superficie en el hemidelta sur desde 1956 (Foto) hasta 2018 (Fuente: IGN)

4.4.4.1.7 *Z₆: Trabucador*

Toda la barra del Trabucador es de dominio público, por lo que **no sería necesario proyectar banda de protección** alguna. Sin embargo, sí se debería tener en cuenta que la falta de sedimento que llega a ella, la debilita paulatinamente y, en eventos especiales que en el futuro serán frecuentes, se agravará más, dejándola bajo el agua en determinados momentos, cada vez más habituales.

La barra conecta el cuerpo del Delta con la península de la Banya; sobre ella se sitúa una carretera de conexión que sirve de servicio a la explotación salinera. Esta infraestructura rígida choca con el comportamiento natural flexible de la barra; lo que puede agravar su comportamiento en eventos extremos y en su recuperación tras ellos. En este contexto tendría que pensarse en una alternativa a ella (camino de tierra, transporte de sal por mar, traslado de la explotación, política de subvenciones, etc.).

También, desde el punto de vista medioambiental y la protección de especies como la nacra, sería conveniente evitar las roturas de esta barra, cuya frecuencia ha ido aumentando, reduciendo su fragilidad y frenando su estado erosivo mediante la reposición de arena manteniendo una continuidad de caudal sólido respecto mediante trasvases de arena.

4.4.4.1.8 Z_7 : Península de la Banyá

Toda ella es de dominio público, aunque contiene una concesión salinera, por lo que **no se considera necesario determinar la anchura de la banda de protección**. La situación de la barra del Trabucador hace que se encuentre aislada de tierra que se hará más habitual a medida que pase el tiempo.

La descompensación sedimentaria hace que se erosione en la zona NE y se acrecente en la zona SW; quizás interfiriendo con la navegabilidad de los puertos de San Carles de la Rápita y embarcadero de Alcanar. Esta circunstancia le hace a esta última zona como propicia para ser un punto de toma de sedimento para retro trasvase.

4.4.4.1.9 S_{Sur} : Bahía de los Alfaques

En esta zona los efectos más importantes son los retrocesos debidos a la subida del nivel del mar y subsidencia; no afectando el debido a temporales.

Anchura de resguardo, ΔX_{Total} :

- Interior bahía de los Alfaques: $\Delta X_{Total} = 200$ m

Altura de berma: $B_{min} = 2,54$ m

Altura de mota o duna: $D = 1,34$ m

Algo inferior, pero similar, a la proyectada por Galofré et al. (2012).

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería (Figura 29): 2.033.065 m².

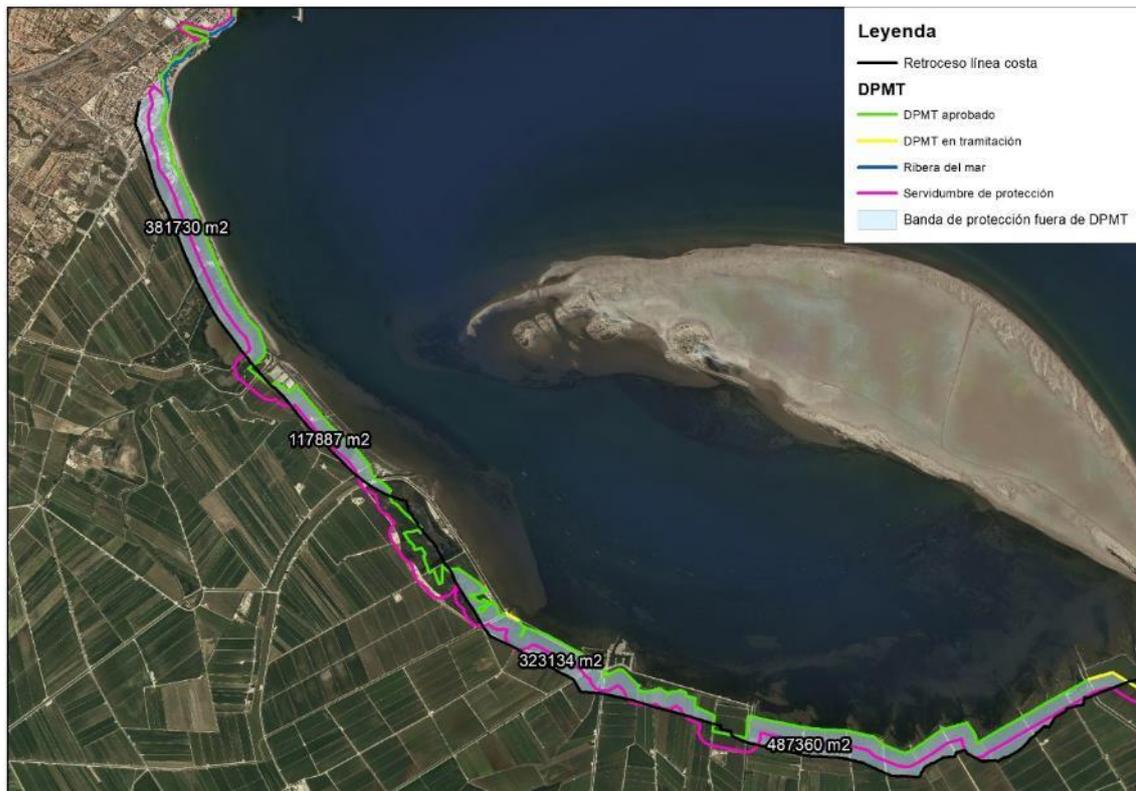


Figura 23. Banda de protección zona del Sumidero Norte (Foto: PNOA)



Figura 24. Banda de protección Zona 2 (Z₂) (Foto: PNOA)



Figura 25. Banda de protección Zona 3 (Z₃) (Foto: PNOA)



Figura 26. Línea de retroceso futuro esperado zona 4 (Z₄) (Foto: PNOA)

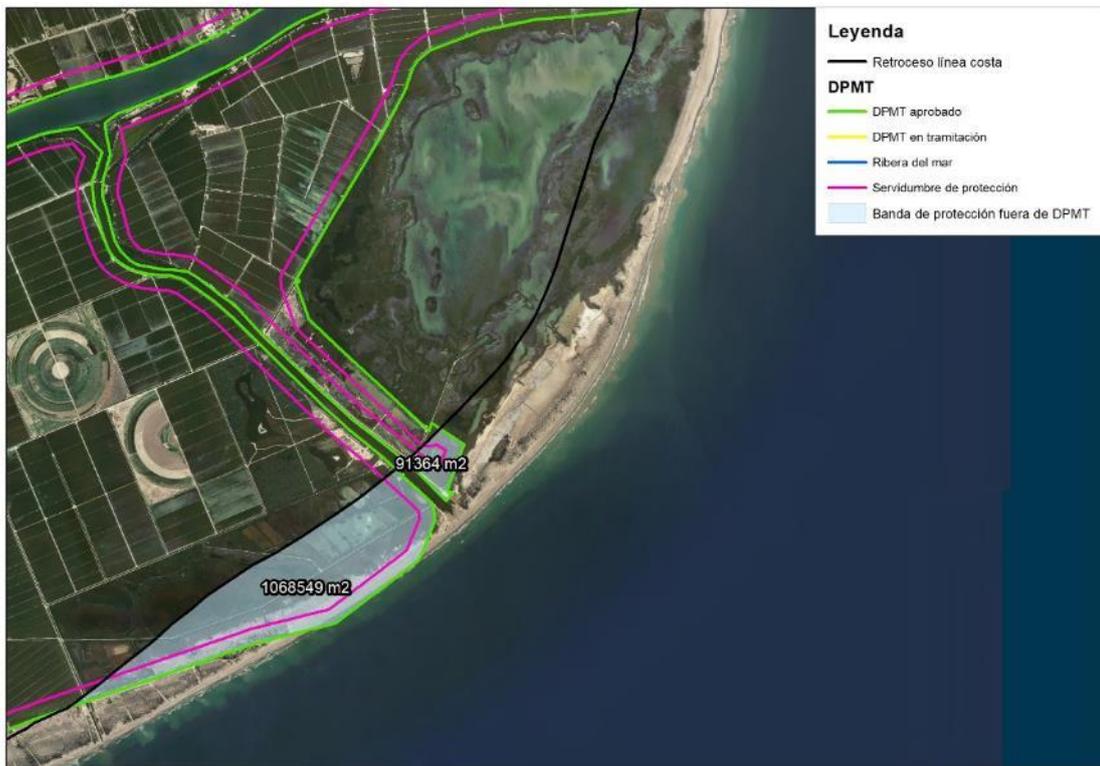


Figura 27. Banda de protección zona 4 (Z₄) y norte de Z₅ (Foto: PNOA)



Figura 28. Banda de protección zona 5 (Z₅)



Figura 29. Banda de protección zona del Sumidero Sur (Foto: PNOA)

El total de superficie que tendría que pasar a dominio público teniendo en cuenta todas las zonas del Delta sería: 8.320.547 m².

4.4.4.2 Traslases de arena de las zonas de depósito a las zonas erosivas

El proceso natural actual, con las condiciones de desarrollo y explotación de la cuenca del Ebro y su delta, hace que se produzcan transformaciones en la configuración morfológica de la llanura deltaica y en las formaciones asociadas de su estado natural primitivo. La evolución natural actual esperable hace que se tienda a crear tres zonas que pueden colapsar, provocando transformaciones bruscas, en tres puntos de ella: Bahía del Fangar, Desembocadura y barra del Trabucador.

En el primero de los casos, Bahía del Fangar, esta situación se produce por exceso de sedimento que alcanza la península del mismo nombre, con una reducción importante y paulatina de la anchura del canal que conecta ésta con el mar exterior en L'Ampolla. Si se deja evolucionar como hasta el momento, su futuro más probable es convertirse en una laguna litoral sin conexión con el mar. Para evitar esta situación se considera que **una medida adicional a la creación de una banda de protección podría ser realizar un trasvase de arena desde la zona de depósito (punta del Fangar) hacia dos puntos:** 1) Playas de la Marquesa y Balsa de Arena; 2) Desembocadura (Illas de Sant Antoni y Buda). El esquema general de esta actuación se presenta en Figura 30.

Este movimiento de arena hacia la Illa de Buda mediante traslases, tanto desde la Punta del Fangar (Figura 26) como de la zona de Eucaliptus (Figura 27) tiene como objeto prioritario mantener y defender un área con valores naturales de excepcional interés.

La cantidad a trasvasar y su frecuencia debe ser objeto de un trabajo específico que diseñe esta propuesta de actuación, pero siempre tiene que ser acorde con los resultados obtenidos en el balance sedimentario, al objeto de no alterarlo.



Figura 30. Esquema del trasvase propuesto desde la punta del Fangar hacia la desembocadura (Foto: Google Earth)

Yendo hacia el sur, la desembocadura actual se formó hace casi 100 años, lo que ha provocado las descompensaciones sedimentarias en el Delta. Entre sus efectos destaca la reducción paulatina de la longitud del cabo Tortosa (LIM, 2011), cuya distancia actual al cauce del río es de 800 m. Con la tasa erosiva o de retroceso determinada en los informes citados, para el año 2100, el retroceso esperado de este cabo estaría en una horquilla entre 550 a 2.000 m, con una media de unos 1.300 m.

Con esa perspectiva, la desembocadura actual se vería muy alterada, desapareciendo la isla de Sant Antoni y gran parte de la Illa de Buda, debiéndose conformar una desembocadura nueva en la zona de Riumar. Todos estos problemas dan pie a que se proponga como **medida adicional a la creación de una banda de protección un doble trasvase, uno procedente de la punta del Fangar (expuesto más arriba) y otro con el excedente de sedimento detectado en Eucaliptus y en la punta de la Banya (expuesto también anteriormente)**. El esquema propuesto se ilustra en la Figura 31.

Al igual que en el caso anterior, la cantidad a trasvasar y su frecuencia debe ser objeto de un trabajo específico que excede a este Plan, pero siempre tiene que ser acorde con los resultados obtenidos en el balance sedimentario.

El tercero de los puntos donde una parte del Delta puede verse muy alterado es la barra del Trabucador, tal como se ha comentado en los apartados anteriores con consecuencias medioambientales importantes. Esta alteración se podría reducir significativamente mediante un trasvase periódico depositando la arena al norte del Trabucador y al sur de la playa de L'Aluet (Figura 31), con las mismas consideraciones expuestas anteriormente en relación con cantidades, frecuencia y metodología a seguir.

Todas estas propuestas de trasvases podrían requerir de estrategias para la retención de arena para aumentar su eficacia y evitar la entrada de arena en las bahías, si bien en un entorno natural como es el Delta del Ebro, con una dinámica litoral tan activa, podrían tener muchos impactos negativos, por lo que su situación, necesidad y diseño debe evaluarse en proyectos específicos.



Figura 31. Esquema de los trasvases propuesto desde Eucaliptus hacia la Illa de Buda y desde la punta de la Banya hacia el Trabucador (Foto: Google Earth)



Madrid, febrero de 2021

Consejero Técnico de Estudios Ambientales

Personal Investigador

Fdo.: José Manuel de la Peña Olivas
(Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos)

Fdo.: Miriam García Oliva
(Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos)

EXAMINADO Y CONFORME:

El Director de la Unidad de Apoyo de I+D+i
Área de Ingeniería de Costas

Fdo.: José Francisco Sánchez González
(Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos)

Vº Bº.

El Director del Centro de Estudios de Puertos y Costas

Fdo.: José María Grassa Garrido
(Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos)



ANEJO 1: VALORES AMBIENTALES DEL DELTA DEL EBRO



ANEJO 1: VALORES AMBIENTALES DEL DELTA DEL EBRO

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	VALORES AMBIENTALES	2
	2.1 Unidades naturales más destacadas del paisaje	2
	2.2 Biodiversidad	3
	2.3 Espacios de la Red Natura 2000	4
	2.3.1 ZEPA - ES0000512 Espacio marino del Delta de l'Ebre - Illes Columbretes	4
	2.3.2 ZEC ES0000020-Delta de l'Ebre	6
	2.4 Objetivos y medidas de conservación	9
3	USOS ACTUALES	9
	3.1 Usos y Actividades Terrestres	9
	3.1.1 Morfología y suelos	9
	3.1.2 Asentamientos humanos y población	11
	3.1.3 Usos del suelo y socioeconomía	12
	3.1.4 Infraestructuras	15
	3.2 Usos y actividades en medio marino	17
	3.2.1 Acuicultura (peces y moluscos)	19
	3.2.2 Pesca extractiva	23
	3.2.3 Instalaciones e infraestructuras para la prospección, explotación y extracción de hidrocarburos	23
	3.2.4 Instalaciones e infraestructuras para la producción de energía procedente de fuentes renovables	26
	3.2.5 Transporte y tráfico marítimo	28
	3.2.6 Zonas de vertido	30
	3.2.7 Zonas e instalaciones de interés para la Defensa Nacional	33
	3.2.8 Actividades turísticas, recreativas, culturales y deportivas	33
4	ESPECIES EXÓTICAS INVASORAS EN EL DELTA DEL EBRO	35



1 Introducción

El Delta del Ebro es un espacio singular de la cuenca Mediterránea cuyos paisajes actuales son un ejemplo claro del resultado de la interacción del hombre a lo largo del tiempo con el medio. Por ello, el Delta es un hito de la biodiversidad española en la costa mediterránea ya que alberga en su ámbito espacios y especies singulares y de alto valor de conservación, a pesar de las presiones crecientes que recibe y del intenso uso agrícola y pesquero que en el mismo se realiza.

Sin embargo, se trata de un lugar amenazado que ya está sufriendo los embates de dos de las mayores amenazas globales al medio ambiente: los efectos del cambio climático y la alteración de los procesos biológicos existentes como consecuencia de la acción del hombre. Los efectos del cambio climático se hacen presentes en la aparición cada vez más frecuente de fenómenos meteorológicos extremos, la elevación del nivel del mar y las alteraciones del régimen de oleaje. Por otro lado, la intensificación de los usos tanto del suelo como del mar, junto a la modificación de los hábitats (naturales o intensamente antropizados) y la aparición de especies alóctonas (algunas con carácter invasor), producen alteraciones de los procesos biológicos que tienen como consecuencia la amenaza a la supervivencia de los elementos naturales con un alto valor de conservación.

A lo largo de este anejo y con el fin de contribuir al conocimiento del medio de cara a posibles soluciones a desarrollar, se hace un repaso de los distintos elementos que lo definen.

En primer lugar, se describen los valores ambientales del Delta del Ebro, en donde se ha hecho una descripción de las unidades de paisaje más destacadas, la identificación de las especies de flora y fauna presentes en él y los distintos elementos de la Red Natura 2000, exponiendo de forma sucinta las distintas medidas contempladas en los planes de gestión existentes.

A continuación se repasan los usos actuales del suelo y el medio marino y costero. El epígrafe comienza con una breve descripción de la morfología y tipos de suelo existentes, al que sigue una relación de asentamientos humanos y la evolución de la población en el tiempo. Continúa con una descripción de los usos del suelo, en los que destaca el cultivo del arroz por encima de todos los demás y las actividades económicas desarrolladas, en las que se observa un despegue del turismo de naturaleza en los últimos años, para describir a continuación las infraestructuras terrestres y costeras presentes en el área. En este mismo epígrafe se describen de forma diferenciada los usos y actividades marinas, donde se destaca el importante desarrollo de la acuicultura, la pesca y la navegación, entre otras, así como las actividades náuticas relacionadas con el turismo. La inclusión de este capítulo de carácter socioeconómico, permite poner de manifiesto la especial importancia de las actividades económicas como pilar fundamental en la economía del Delta del Ebro y su papel en la identidad cultural y en la fijación de población del entorno.

Finaliza este anejo con la inclusión de un epígrafe específico en el que se describen las especies exóticas o alóctonas más importantes presentes en el Delta del Ebro, casi todas ellas con carácter de invasoras. Resulta fundamental su inclusión habida cuenta de que su presencia resulta un factor determinante de alteración de los valores naturales que definen el Delta del Ebro.

En conclusión, los valores naturales del Delta del Ebro son resultado de la singularidad de los distintos tipos de biotopos y ecosistemas presentes en él, cauce y riberas del río Ebro, humedales, marismas, sistemas dunares, sistemas costeros y bahías. Todos ellos presentan un alto valor de conservación, si bien se han visto profundamente alterados por los cambios de uso del suelo tanto de la cuenca vertiente, como en el propio delta (principalmente los arrozales y sus sistemas de riego y drenaje), así como por los

aprovechamientos en el medio marino (acuicultura y piscicultura) y la presencia de infraestructuras hidráulicas en la cuenca y en el propio delta (presas, canales, azudes, etc.) y costeros (puertos, actuaciones de protección en la costa) que también tienen un importante papel como factores de amenaza para su conservación. A todos ellos hay que sumar la reciente aparición de especies exóticas en el propio delta con la presión que su presencia ejerce sobre los distintos ecosistemas, especialmente cuando o adquieren la condición de invasoras.

2 Valores ambientales

El delta del Ebro es la zona húmeda más grande de Cataluña y una de las más importantes de Europa occidental junto con el parque nacional de Doñana y el parque regional de la Camarga (Francia). A fin de garantizar la conservación de sus especiales características biológicas y paisajísticas fue declarado parque natural en agosto de 1983, con la denominación oficial de Parc natural del Delta de l'Ebre, y ampliado en 1986. Es zona ZEPA, espacio del Convenio de Ramsar y forma parte de la Reserva de la biosfera de las Tierras del Ebro.

2.1 Unidades naturales más destacadas del paisaje

A continuación se describen brevemente a nivel de paisaje los principales elementos que se reconocen en este espacio y sus valores ambientales más destacables (Figura 2.1).



Figura 2.1. Imagen satélite del Parc Natural del Delta de l'Ebre señalando las zonas más emblemáticas

Los elementos singulares del paisaje del delta del Ebro se describen brevemente a continuación:



Dunas móviles

En el delta se localizan playas arenosas a partir de las cuales se ha originado un extenso y dinámico paisaje dunar. Las dunas están ligadas al transporte de los sedimentos de las playas de modo que dependen de su proximidad al mar y de los vientos. Asociadas a estas dunas encontramos unas comunidades de plantas y fauna silvestres muy características, dependientes de sus peculiares condiciones ambientales. Conforman ecosistemas muy sensibles a las actividades humanas, como por ejemplo la urbanización del litoral, el paso de personas y vehículos y el uso de maquinaria, de donde se deriva el interés por su conservación.

Lagunas

Las lagunas del delta en algunos casos reciben aportaciones de agua de mar durante los temporales de levante, especialmente en invierno, de modo que presentan una salinidad más elevada. En estos casos se encuentran rodeadas de vegetación típica de salobrar (comunidad *Arthrocnemum fruticosi*) donde predomina la salicornia. Otras reciben agua dulce de los arrozales y de los canales, presentando comunidades muy diferentes de las anteriores, tanto las sumergidas como las de carácter helofítico que rodean las lagunas. Algunas lagunas se encuentran comunicadas directamente con el mar mediante canales, unas veces naturales y otras artificiales, mientras que otras carecen de estos canales. En las salinas aparecen comunidades características como son las junqueras halófilas.

Bosque de ribera

Las únicas comunidades forestales del delta son las alamedas de los márgenes del río Ebro. En las riberas salobres y en las dunas húmedas se encuentran los tarajes.

2.2 Biodiversidad

Sobre el marco físico descrito se desarrollan la flora y la fauna del delta del Ebro que se describe a continuación.

Flora

En el delta los suelos presentan un acusado gradiente de salinidad que oscila desde los suelos salados hasta las tierras fértiles aptas para el cultivo. La diversidad vegetal a que da lugar permite el desarrollo de extensas comunidades características de las zonas húmedas en un estado de conservación notable.

Las comunidades más importantes son las **salinas**, en las que el agua marina penetra en la capa freática y al evaporarse concentra las sales en la superficie. La vegetación halófila de terrenos salinos agrupa las comunidades vegetales *Arthrocnemum fruticosi*, *Schoeno-Plantaginietum crassifoliae*, *Salicornietum emerici* y *Crucianelletum maritimae*, bien representadas cerca de las salinas de San Antonio, en la Cerrada, y en las de la Trinidad, en la Punta del Cuerno.

La comunidad helofítica que rodea a las lagunas está conformada por cañaverales y carrizales, en algunos casos extensos, como en la isla de Buda, donde se conocen localmente como “quemados”. Su importancia es extrema por retener los sedimentos arrastrados por el viento y evitar la erosión de las cubetas y constituyen un recurso necesario para las aves acuáticas. Sus comunidades son *Typho-Schoenoplectetum glauci* y *Scirpetum maritimi-littoralis*. En la zona denominada Los Colmillos (surgencias de agua dulce en la parte occidental del hemidelta sur) se puede encontrar la comunidad *Potamogetum denso-nodosi*, rica en nenúfar (*Nymphaea alba*). En algunas lagunas la acción de los fitosanitarios empleados en los cultivos ha reducido considerablemente la extensión de la vegetación.



CEDEX

En las dunas más estables aparecen comunidades vegetales psammófilas, adaptadas a la movilidad del suelo, la alta permeabilidad y un elevado índice de reflexión solar. Estas comunidades vegetales de las dunas o *Ammophiletea*, que están más o menos fijadas, corresponden a las comunidades *Agropyretum mediterraneum*, *Ammophiletum arundinaceae* y *Crucianelletum maritimae*, como más importantes. Son características de estas zonas *Ammophila arenaria* (barrón), *Euphorbia paralias* y *Limoniastrum monopetalum* (salado).

Entre la vegetación riparia (*Populetales* y *Nerio Tamaricetea*) sobresale *Populus alba*, especialmente presente en la Isla de Gracia, y que forma parte de la comunidad *Vinco-Populetum albae*. Otra comunidad de este tipo que puede encontrarse es la *Arundini-Convolvuletum sepium*. En las riberas salobres y en las dunas húmedas podemos encontrar los tarajes (*Tamarix gallica*), pertenecientes a la comunidad *Tamaricetum canariensis*.

Fauna

El humedal del delta del Ebro es de importancia internacional para cientos de especies de fauna vertebrada, siendo la mayoría aves. El delta del Ebro alberga unas 360 aves de las 600 existentes en Europa. 95 son nidificantes y muchas otras invernan, reposan y se alimentan durante las migraciones. También destacan por su singularidad algunas especies de reptiles, peces e invertebrados, especialmente la nacra (*Pinna nobilis*), que actualmente se encuentra en un grave estado de declive.

Precisamente, este riesgo inminente de extinción de la nacra ha llevado a su declaración en situación crítica, por la Orden TEC/1078/2018, de 28 de septiembre, siguiendo el dictado del artículo 60 apartado 2 de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y la Biodiversidad. La declaración de situación crítica conlleva que las obras y proyectos encaminados a su recuperación tendrán la consideración de interés general y su tramitación tendrá carácter de urgencia.

La principal causa de la desaparición de este molusco ha sido el protozoo parásito *Haplosporidium pinnae*. A principios de 2016 se produjo un primer brote que hizo desaparecer el 99% de las poblaciones de esta especie de la costa española. Actualmente, las poblaciones de nacra común se consideran casi extinguidas por toda la costa española y solo se puede localizar ejemplares aislados. Las únicas poblaciones que se mantienen están localizadas en la zona del delta del Ebro y en la del mar Menor.

(Fuente: La nacra amenazada de peligro de extinción; aquarium de Barcelona, 2020)

2.3 Espacios de la Red Natura 2000

Se indican en este epígrafe los principales elementos que forman parte de RN 2000 en el ámbito del Delta del Ebro.

2.3.1 ZEPA - ES0000512 Espacio marino del Delta de l'Ebre - Illes Columbretes

Este espacio marino ocupa una superficie de 9.017,08 km² y comprende la totalidad de la plataforma y parte del talud continental bajo la influencia directa del río Ebro (Figura 2.2). Se extiende paralelo a la costa a lo largo de más de 140 km, desde el cabo de Salou al norte hasta el entorno de las Islas Columbretes y Castellón de la Plana al sur. Los aportes sedimentarios del Ebro a lo largo del tiempo explican la presencia de una plataforma continental particularmente amplia en esta zona que, en algunos puntos, se extiende hasta unos 70 km de la costa.

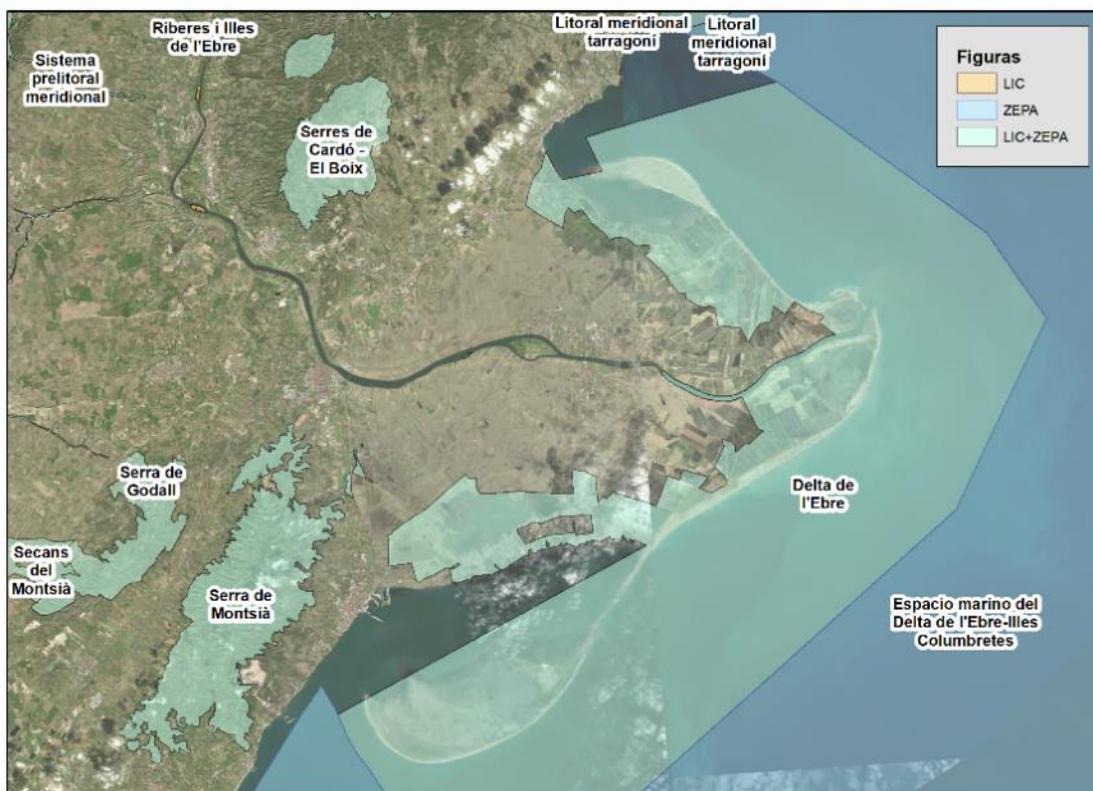


Figura 2.2.- Espacios de Red Natura 2000 en el ámbito del delta del Ebro IDE MITERD
 (<https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/>)

Engloba una de las áreas marinas de alimentación más importantes para las aves marinas en todo el Mediterráneo. En el caso de las especies más ligadas a la costa, como gaviotas y charranes, la riqueza en alimento se traduce en la presencia de importantes colonias de cría adyacentes a la zona marina, principalmente en el delta y, en menor medida, en las Islas Columbretes. Cabe destacar entre éstas a la gaviota de Audouin (*Larus audouinii*), que concentra en el delta dos tercios de su población reproductora mundial. En el caso de especies con mayor capacidad de desplazamiento, como pardelas y paíños, un elevado número de individuos se desplaza a alimentarse hasta esta zona desde colonias de cría distantes, principalmente de Baleares, aunque las Islas Columbretes también albergan pequeñas poblaciones reproductoras de pardela cenicienta (*Calonectris diomedea*) y paño europeo (*Hydrobates pelagicus*). Asimismo, la zona representa la principal área de invernada para la gaviota cabecinegra (*Larus melanocephalus*) a nivel mundial– y los pasos migratorios de numerosas especies. Especies por las que se declara Zona de Especial Protección para las Aves:

- | | | |
|----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| A200 <i>Alca torda</i> | A066 <i>Melanitta fusca</i> | A384 <i>Puffinus puffinus</i> |
| A193 <i>Sterna hirundo</i> | A065 <i>Melanitta nigra</i> | <i>mauretanicus</i> |
| A197 <i>Chlidonias niger</i> | A069 <i>Mergus serrator</i> | A464 <i>Puffinus yelkouan</i> |
| A204 <i>Fratrercula arctica</i> | A180 <i>Larus genei</i> | A173 <i>Stercorarius parasiticus</i> |
| A002 <i>Gavia arctica</i> | A016 <i>Morus bassanus</i> | A172 <i>Stercorarius pomarinus</i> |
| A003 <i>Gavia immer</i> | A604 <i>Larus michahellis</i> | A175 <i>Stercorarius skua</i> |
| A001 <i>Gavia stellata</i> | A177 <i>Larus minutus</i> | A195 <i>Sterna albifrons</i> |
| A181 <i>Larus audouinii</i> | A179 <i>Larus ridibundus</i> | A189 <i>Gelochelidon nilotica</i> |
| A183 <i>Larus fuscus</i> | A392 <i>Phalacrocorax aristotelis</i> | A191 <i>Sterna sandvicensis</i> |
| A176 <i>Larus melanocephalus</i> | <i>desmarestii</i> | A010 <i>Calonectris diomedea</i> |
| A014 <i>Hydrobates pelagicus</i> | | |



CEDEX

2.3.2 ZEC ES0000020-Delta de l'Ebre

Presenta una superficie terrestre de 12.737,98 ha y marina de 35.647,11 ha, en total 48.385,09 ha. El objetivo de esta Zona Especial de Conservación es el mantenimiento del delta, caracterizado por tratarse de un sistema dinámico resultado de un continuo de procesos estructurales y de las transformaciones antrópicas de los últimos años. La población vegetal del Delta es la mejor muestra de la vegetación de marjales y costera del litoral arenoso en Cataluña, que acoge algunos elementos de gran singularidad. La fauna del Delta es particularmente rica y variada y está representada por varios grupos tanto de invertebrados como de vertebrados, entre los que destacan las aves. La gran diversidad de ambientes deltaicos acoge poblaciones faunísticas también diversas, algunas de ellas muy interesantes desde un punto de vista zoogeográfico. El delta constituye un extenso humedal que acoge un conjunto de sistemas naturales, acuáticos y terrestres, de excepcional singularidad y diversidad. Por sus dimensiones y variedad morfológica, constituye la formación deltaica más importante del mediterráneo occidental. La notable diversidad de ambientes se traduce en un paisaje singular con un poblamiento faunístico muy relevante, sobre todo ornitológico. Destaca la presencia de diversas aves con una población muy relevante a nivel de toda la región biogeográfica mediterránea, muy especialmente de *Larus audouinii*.

En la Tabla 2.1 se recogen las especies de interés comunitario de presencia segura y probable.

Código	Nombre científico (nombre vulgar)	Elemento clave	Superficie/ longitud en espacio	% sup. región
Especies de presencia segura				
1044	<i>Coenagrion mercuriale</i> (caballito del diablo)	No	1 nº UTM10	3,7
1095	<i>Petromyzon marinus</i> (lamprea marina)	Sí	11,42 km	19,73
1103	<i>Alosa fallax</i> (saboga)	Sí	11,42 km	18,4
1126	<i>Chondrostoma toxostoma</i> (madrilla)	No	4 nº UTM10	4,04
1149	<i>Cobitis taenia</i> (<i>paludicola</i>) (lisa)	Sí	1,97 ha	5,92
1151	<i>Aphanius iberus</i> (fartet)	Sí	2.642,83 ha	85,9
1153	<i>Valencia hispanica</i> (samarugo)	Sí	135,72 ha	72,11
1217	<i>Testudo hermanni</i> (tortuga mediterránea)	Sí	2403 ha	9,82
1220	<i>Emys orbicularis</i> (galápago europeo)	Sí	6 nº UTM10	33,33
1221	<i>Mauremys leprosa</i> (galápago leproso)	Sí	5 nº UTM10	7,58
1224	<i>Caretta caretta</i> (tortuga boba)	Sí	7 nº UTM10	24,14
1304	<i>Rhinolophus ferrumequinum</i> (murciélago grande de herradura)	No	10.448,55 ha	0,39
1349	<i>Tursiops truncatus</i> (delfín mular)	No	1 nº UTM10	4
1581	<i>Kosteletzkya pentacarpa</i> (malva de agua)	Sí	176,41 ha	78,7
Especies de presencia probable				
1303	<i>Rhinolophus hipposideros</i> (murciélago pequeño de herradura)	No	3,16 ha	0
1324	<i>Myotis myotis</i> (murciélago ratonero grande)	No	123,09 ha	0,01

Tabla 2.1. Especies de interés comunitario descritas en el espacio (Anexo II Directiva 92/43, de Hábitats).

Fuente: http://zec2.ctfc.cat/fitxa_espais.php?id=ES0000020&codiRegio=MED

Incluye además las siguientes Reservas Naturales de Fauna Salvaje: Estación biológica el Canal Viejo, isla de San Antonio, laguna de la Cerrada y Punta del Fangar. Además, incluye las Reservas Naturales Parciales de Punta del Cuerno y de Isla de Sapinya.

Hábitats de interés comunitario

En la tabla siguiente se detallan los 35 hábitats de interés comunitario que se encuentran en el delta, cinco de ellos de interés prioritario (Tabla 2.2 y Figura 2.3).

Tabla 2.2. Hábitats de interés comunitario en el ámbito del delta.

Código	Hábitat de interés comunitario
1110	Bancos de arena cubiertos permanentemente por agua marina, poco profunda
1120*	Praderas de posidonia
1130	Estuarios
1140	Llanos costeros arenosos o limosos, a menudo recubiertos de mantos microbianos
1150*	Lagunas costeras
1160	Grandes calas y bahías de aguas someras
1170	Fondos marinos rocosos y concreciones biogénicas sublitoral
1210	Vegetación anual sobre desechos marinos acumulados
1310	Vegetación anual pionera con <i>Salicornia</i> y otras especies de zonas fangosas o arenosas
1320	Espartinas
1410	Pastizales salinos mediterráneos (<i>Juncetalia maritimi</i>)
1420	Matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos (<i>Sarcocornetea fruticosae</i>)
1430	Matorrales halonitrófilos (<i>Pegano-Salsoletea</i>)
1510*	Comunidades halófilas de los suelos de humedad muy fluctuante
2110	Dunas móviles
2120	Dunas móviles de litoral con <i>Ammophila arenaria</i> (dunas blancas)
2190	Depresiones húmedas interdunares
2210	Dunas fijas de litoral <i>Crucianellion maritimae</i>
2230	Dunas con céspedes <i>Malcolmietalia</i>
3140	Aguas oligomesotróficas calizas con vegetación bénticos de <i>Chara spp.</i>
3150	Lagos eutróficos naturales con vegetación <i>Magnopotamion</i> (sumergida) o <i>Hydrocharition</i> (flotante)
3260	Ríos, de pisos de planicie a montano con vegetación de <i>Ranunculion fluitantis</i> y de <i>Callitricho-Batrachion</i>
3280	Ríos mediterráneos de caudal permanente del <i>Paspalo-Agrostidion</i> con <i>Salix</i> y <i>Populus alba</i>
5320	Formaciones bajas de <i>Euphorbia</i> próximas a los acantilados
5330	Matorrales termomediterráneos y pre-estépicos
6220*	Zonas subestépicas de gramíneas anuales del <i>Thero-Brachypodietea</i>

Código	Hábitat de interés comunitario
6420	Prados húmedos mediterráneos de hierbas altas del <i>Molinion-Brachypodietea</i>
6430	Megaforbios eutrofos hidrófilos de las orlas de llanura y de los pisos montano a alpino
7210*	Turberas calcáreas del <i>Cladium mariscus</i> y con especies del <i>Caricion davallinae</i>
8130	Desprendimientos mediterráneos occidentales y termófilos
8210	Pendientes rocosas calcícolas con vegetación casmofítica
92A0	Bosques galería de <i>Salix alba</i> y <i>Populus alba</i>
92D0	Bosquetes y matorrales meridionales de ramblas, arroyos y lugares húmedos (<i>Nerio-Tamaricetea</i>)
9240	Robledales ibéricos de <i>Quercus faginea</i> y <i>Quercus canariensis</i>
9340	Bosques de <i>Quercus ilex</i> y <i>Quercus rotundifolia</i>

Entre los hábitats de interés comunitario prioritarios destaca *Caricion davallinae* (7210), el cual aparece únicamente en los ullals y se encuentra amenazado de desaparición en el ámbito de la Unión Europea, por lo que cualquier actuación se debe diseñar de tal manera que no se prevean afecciones significativas sobre los mismos.

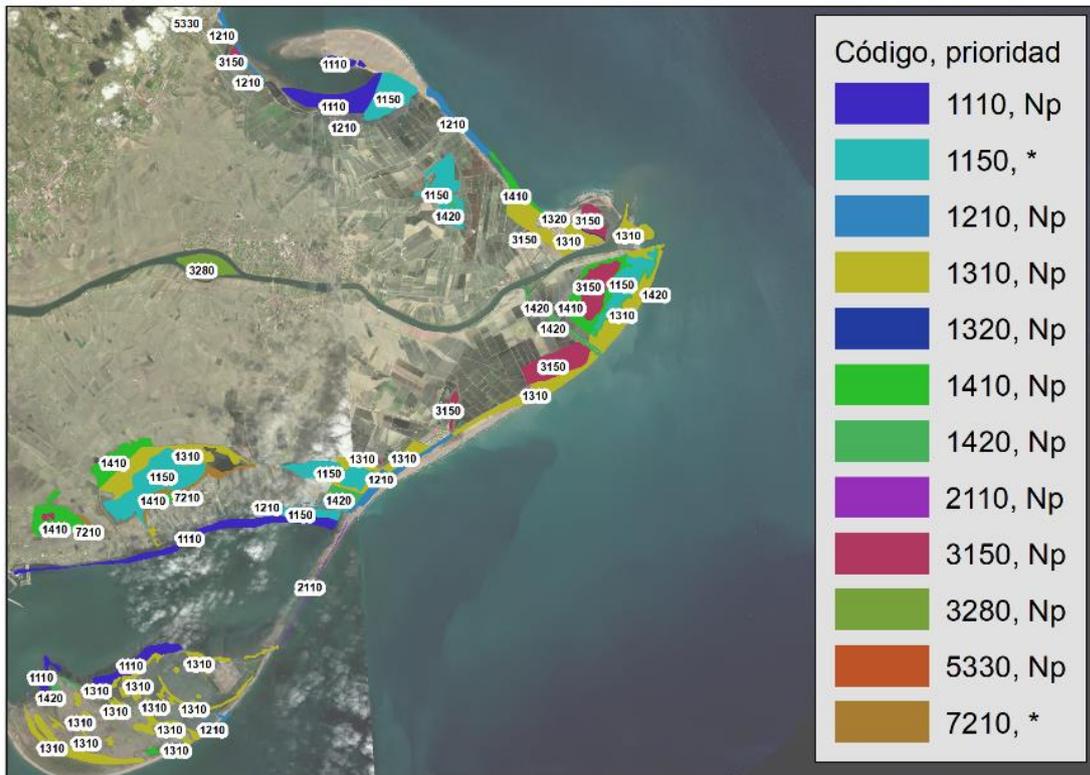


Figura 2.3. Imagen con la localización de Hábitats de Interés Comunitario en el delta.

<https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/>

2.4 Objetivos y medidas de conservación

Existen distintos planes de gestión de los espacios naturales protegidos en la legislación, cuyo fin no es otro que determinar los usos y actividades permitidas en los mismos, con el objetivo de preservar y mejorar los valores ambientales por los que se les otorga protección. Su estructura, responde a los siguientes epígrafes:

Objetivo marco: Mantener en un estado de conservación favorable los hábitats y las poblaciones de las especies presentes en el espacio.

Objetivos de conservación: Alcanzar los objetivos de conservación, principal y secundarios, definidos en las fichas correspondientes a los elementos considerados como Elementos Clave

Medidas de conservación de posible aplicación en el espacio, entre las que caben destacar las siguientes: Gestión preventiva; Delimitación; Vigilancia; Redacción de Planes de mitigación de la contaminación, de recuperación de especies amenazadas, de control de especies exóticas invasoras; Gestión de formaciones vegetales, de restauración de ecosistemas / hábitats, o de áreas degradadas; Conservación de lugares de interés geológico o geomorfológico; Regulación del uso público; Mejora ambiental de las actividades del sector primario; Coordinación con agentes de desarrollo local; Construcción o adecuación de infraestructuras para especies; Prevención y lucha contra incendios o Cartografía temática.

3 Usos actuales

En este capítulo se realiza un análisis de los usos del suelo y del espacio marítimo del delta del Ebro.

3.1 Usos y Actividades Terrestres

3.1.1 Morfología y suelos

El delta del Ebro se encuentra situado en la parte más meridional de Cataluña, dentro de las comarcas tarraconenses del Baix Ebre y Montsià. El Delta tiene la forma aproximada de un triángulo cuya base sería la Carretera Nacional 340 (Cádiz-Barcelona) y cuyo vértice opuesto, configurado por las Islas de Buda y de San Antonio, se adentra unos 25 km en el mar Mediterráneo. Al tratarse de un sistema particularmente dinámico, la forma y superficie del delta han ido variando a lo largo de los siglos (Figuras 3.1.1 y 3.1.2):

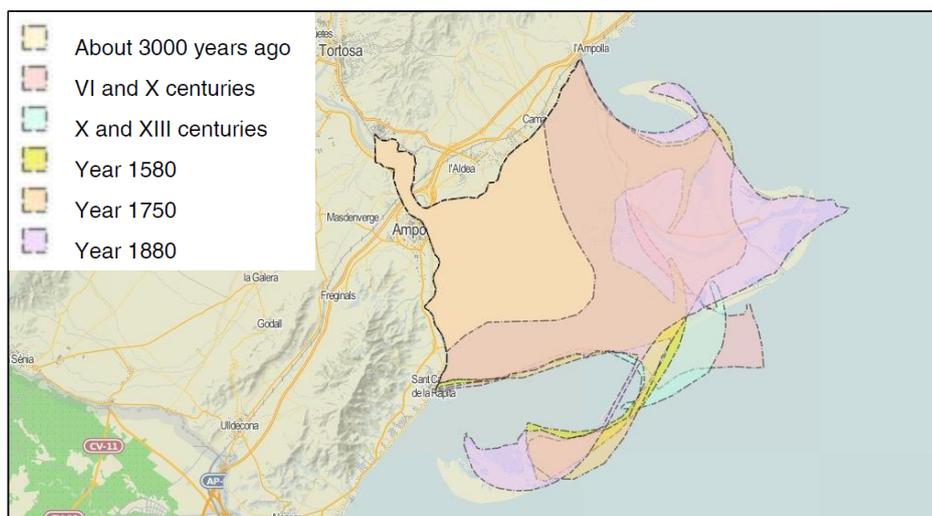


Figura 3.1.1. Configuración aproximada hasta 1880. Fuente: ICGC (2020)

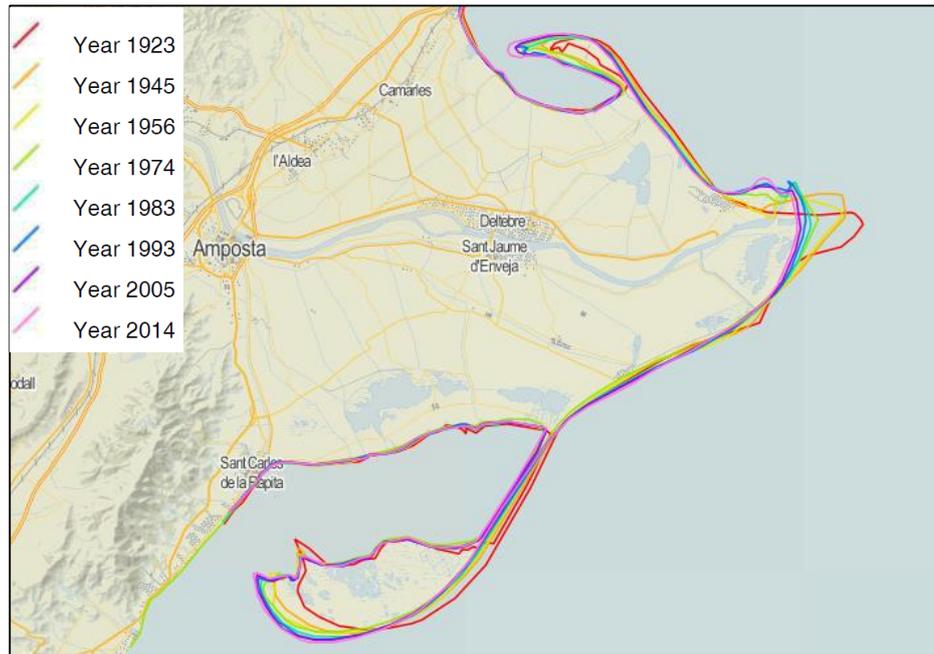


Figura 3.1.2. Configuración entre 1923 y 2014. Fuente: ICGC (2020)

En la actualidad, el total de 32.059 ha que conforman el delta del Ebro (Franquet Bernis *et al.*, 2017) se subdivide en tres zonas: más de la mitad de la superficie (58%) corresponde al llamado hemidelta derecho (o sur), el 37 % lo ocupa el hemidelta izquierdo (o norte), y el 5 % restante serían las islas (siendo la Isla de Buda la de mayor dimensión, el 4 % del área total del delta). La característica morfológica más destacada, y que le confiere la forma de un pájaro en vuelo (Ebre, 2020), es la presencia de dos flechas laterales, el Fangar (en el Noroeste) y la Banya (en el Suroeste), que cierran parcialmente dos bahías: la del Fangar y la de los Alfacs. La superficie aproximada de las dos flechas es de 82 km². La flecha de la Banya está unida al resto del delta por la Barra del Trabucador, de aproximadamente 6 km. de longitud y 250 m. de anchura, y que durante temporales excepcionales puede romperse, convirtiendo la Punta de la Banya en una isla.

La topografía es típica de las llanuras deltaicas, extremadamente plana, no superando los 2 m de altitud y con un 60 % de la superficie en una altitud inferior a 1 m. Aunque los suelos en las riberas del río Ebro y en las zonas de costa tienen una textura mayoritariamente arenosa, la mayoría de las tierras son de carácter limoso con zonas de predominio de turbas, principalmente en el delta derecho (Figura 3.1.3). Salvo en las zonas periféricas, las características de estos suelos han llevado a la ocupación agrícola intensiva en el Delta.

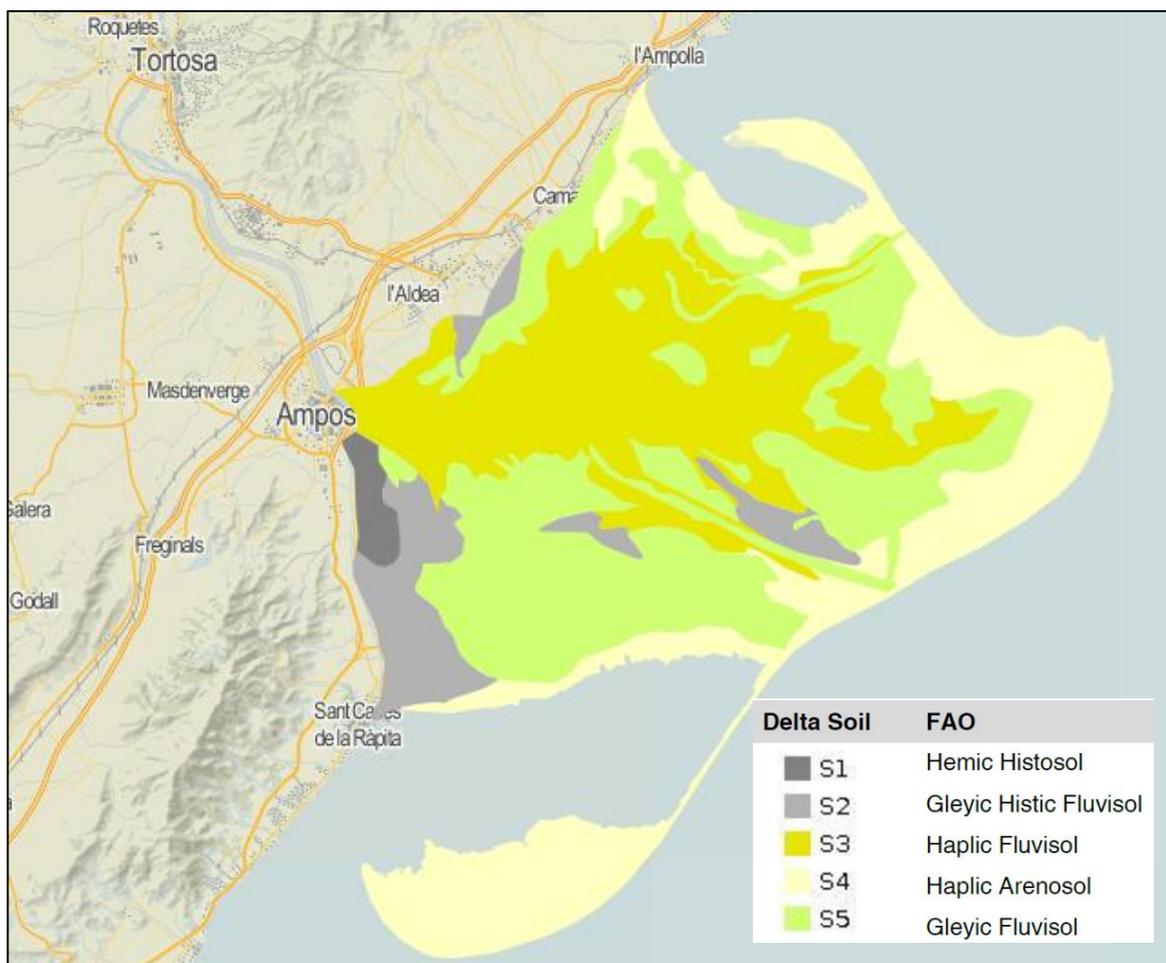


Figura 3.1.3. Tipos de suelos según la Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura - FAO. Fuente: ICGC (2020)

3.1.2 Asentamientos humanos y población

Debido a los continuos cambios en su morfología, el delta no ha tenido una población humana constante hasta tiempos recientes en los que la configuración se mantiene más estable (Departamento de Medio Ambiente y Vivienda, 2020). Aparte de referencias en la toponimia a la época romana o la de dominación árabe (como es el caso de la Ràpita o de Buda), en la Edad Media encontramos el destacamento militar de Amposta, de la orden de los hospitalarios, como centro de influencia en la evolución histórica del delta. En esta época, aparte de la caza y la pesca, destacan como bases económicas tanto la extracción de la sal (exportada a diferentes puntos del Mediterráneo), como la de las sosas (con una incipiente industria jabonera) o la del regaliz, y un intenso pastoreo, mientras que la agricultura se limitaba a las tierras secas.

En los inicios de la Edad Moderna los ataques de los piratas berberiscos afectaron muy negativamente a las poblaciones del delta (el convento de la Ràpita fue abandonado en 1579). En 1607 los monjes de Benifassà, cistercienses, que tenían propiedades en Carrova, hicieron las primeras siembras de arroz, iniciativa que entonces no tuvo continuidad. En 1719 se obtuvieron los primeros permisos para la roturación en terrenos ribereños y en 1851 se concedió el derecho de canalizar el Ebro para intentar su navegabilidad hasta Zaragoza. Concebidos inicialmente como canales de alimentación del Canal Marítimo o de Navegación, la construcción de los canales de riego entre 1860 y 1912 supuso una rápida expansión

del cultivo del arroz, si bien la colonización del delta no pudo ir así de la mano, debido principalmente al paludismo endémico (3.000 muertes hasta 1918). Aunque el hemidelta izquierdo tenía ya antiguos núcleos de población en la Aldea, Camarles y la actual Deltebre, los nuevos núcleos de población fueron surgiendo en el hemidelta sur alrededor de antiguas heredades, como Balada, Sant Jaume d'Enveja, els Muntells, así como Poblenuou del Delta (creado en 1947 con el nombre de Villafranco del Delta).

La población en el delta ha pasado de los 5.278 habitantes de 1857 a cerca de 60.000 en 2019 (IDESCAT, 2020). Unos 15.000 habitantes residen en las poblaciones del interior (Deltebre y Sant Jaume d'Enveja), mientras que el resto lo hacen en las poblaciones situadas en el límite del delta (Sant Carles de la Ràpita, Amposta, L'Aldea, Camarles y l'Ampolla). Existen otros núcleos de población en el interior del delta (Figura 3.1.4.), dependientes de las poblaciones ya citadas, como son Poble Nou, Els Muntells, Balada y las urbanizaciones de Riumar y Eucaliptus.



Figura 3.1.4. Topográfico con ubicación de núcleos de población. Fuente: <http://srv.icgc.cat/>

3.1.3 Usos del suelo y socioeconomía

Los usos del suelo en el delta del Ebro marcan la seña de identidad de una economía basada en los recursos naturales (Day & Maltby 2002). En el medio terrestre, destacan el cultivo del arroz, la industria con base agraria (como la extracción de sal), los núcleos urbanos y las infraestructuras. Por creciente orden de importancia en la economía local hay que señalar el turismo, que se basa también en la riqueza natural.

La ocupación agrícola del Delta del Ebro se ha dado de forma intensa desde el siglo XIX, dejando sin modificar únicamente los espacios periféricos, donde resulta difícil el control de la salinidad, o que presentan sustratos muy desfavorables para el cultivo (Generalitat de Catalunya, 2008). En la actualidad, el 80 % de los 320 km² de superficie total del Delta lo constituyen los cultivos y las zonas urbanas, siendo el principal cultivo el arroz, con un 66 % de la superficie total (21.000 hectáreas). En proporción, los cultivos de huerta y los árboles frutales ocupan pequeñas superficies (Generalitat de Catalunya, 2008). El restante 20 % lo constituyen los ambientes naturales que forman parte del Parque Natural del Delta del Ebro (7.736 ha), repartidos en un 10 % de playas y arenales y otro 10 % de lagunas y marismas (Figura 3.1.5.).

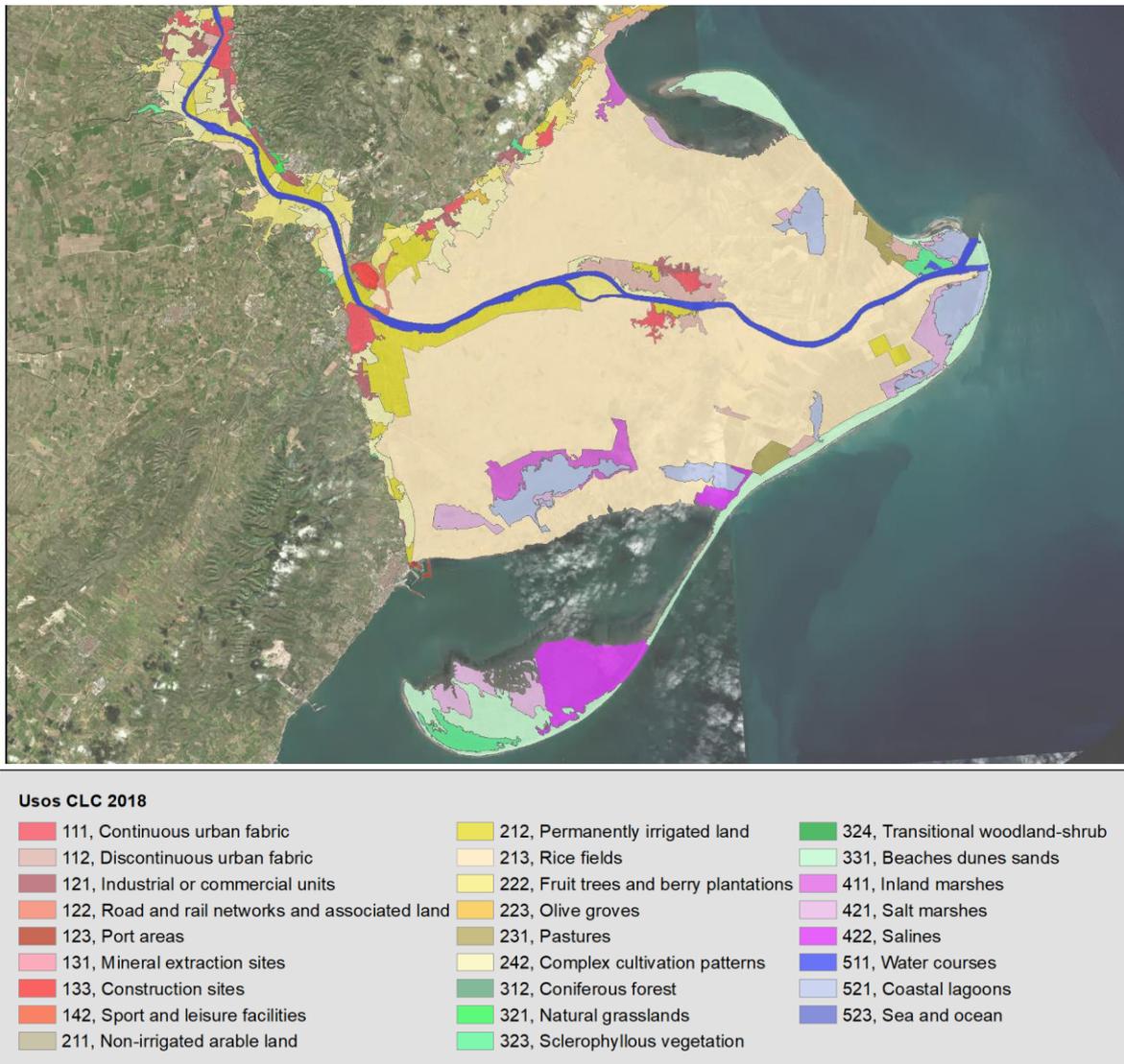


Figura 3.1.5. Usos del suelo. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Corine Land Cover 2018. Fuente: CNIG (2021).

Las marismas eran los ambientes más extensos en el delta antes de su colonización (Figura 3.1.6.), y actualmente sólo ocupan el 5 % de su superficie total (Molinet Coll, 2006).



Figura 3.1.6. Distribución de marismas en 1880. Fuente: ICGC (2020)

En consecuencia, la agricultura, que constituye una de las grandes bases de la economía en el Delta, se encuentra mayoritariamente fundamentada en el cultivo de arroz (unas 120.000 toneladas al año de producción), que además constituye el 98 % de la producción total de este cereal en Cataluña y es la tercera mayor producción dentro de la Unión Europea (Casals *et al.*, 2013). A nivel de usos del suelo, el caso de los arrozales es muy particular, ya que se trata de humedales artificiales que cumplen una serie de funciones ecológicas clave dentro del Delta puesto que conectan ambientes fluviales, lacustres y marinos, intervienen en los ciclos biogeoquímicos como la desnitrificación y son refugio para importantes poblaciones de avifauna.

La industria se encuentra poco desarrollada en el delta y tiene casi siempre una base agraria. La mayor parte de las actividades industriales se localizan en el eje de la carretera N-340, fuera de la plana deltaica. Una actividad industrial que tradicionalmente tenía gran importancia era la extracción de sal de la Punta de la Banya. En el año 1995 se extraían 35.000 toneladas anuales de sal sin refinar, pero los problemas de conexión de la península con el cuerpo principal del Delta a través de la Barra del Trabucador han forzado la disminución del aprovechamiento. Actualmente sólo permanecen Las Salinas de la Trinidad, las únicas que quedan en Cataluña, extrayendo cada año cerca de 25.000 toneladas de sal exportadas en parte al norte de Europa (Pérez García, 2020).

Por otro lado, la actividad que más está creciendo en los últimos años es la terciaria, principalmente el turismo, atraído tanto por el interés científico que tienen la peculiar flora y fauna del lugar, como por su belleza paisajística. Aunque la caza y la pesca deportivas habían sido tradicionalmente un atractivo del Delta, el agroturismo, el ecoturismo y el turismo de navegación fluvial son dos actividades económicas que van a la alza. El Parque Natural del Delta del Ebro, declarado en 1983, ha tenido una gran afluencia de turistas en los últimos años y se ha configurado como un destino de turismo sostenible, con reconocimiento a nivel internacional en 2007 a través de la Carta Europea de Turismo Sostenible (CETS). Los objetivos básicos de la CETS son reconocer el espacio natural protegido como herencia para el futuro

y desarrollar el turismo de manera sostenible, considerando el medio ambiente, las necesidades de los visitantes, la población local y los empresarios.

3.1.4 Infraestructuras

Por lo que respecta a infraestructuras, lo más característico en el Delta del Ebro es el sistema de canales para riego y desagüe de los arrozales, cuyo desarrollo empezó en el siglo XIX (Molinet Coll, 2006) (Figura 3.1.7.). Se trata de sistemas capilares: el de riego parte del azud de Xerta, situado a unos 50 km aguas arriba de la desembocadura del río, desde donde salen los dos canales principales: el Canal de la Derecha del Ebro (construido en 1860) y el Canal de la Izquierda del Ebro (construido en 1912). Desde estos el agua pasa a un conjunto de otros canales, y después a las acequias, hasta llegar a las acequias secundarias, que distribuyen el agua en los arrozales, generalmente por gravedad. Los retornos se abocan en canales de desagüe de sección progresivamente mayor, que finalmente confluyen en dos grandes canales: en el margen derecho del río, el Canal de Circumval·lació, y en el margen izquierdo, el Canal Sanitari. Estos canales proveen agua dulce a las lagunas y bahías del Delta (Generalitat de Catalunya, 2008).

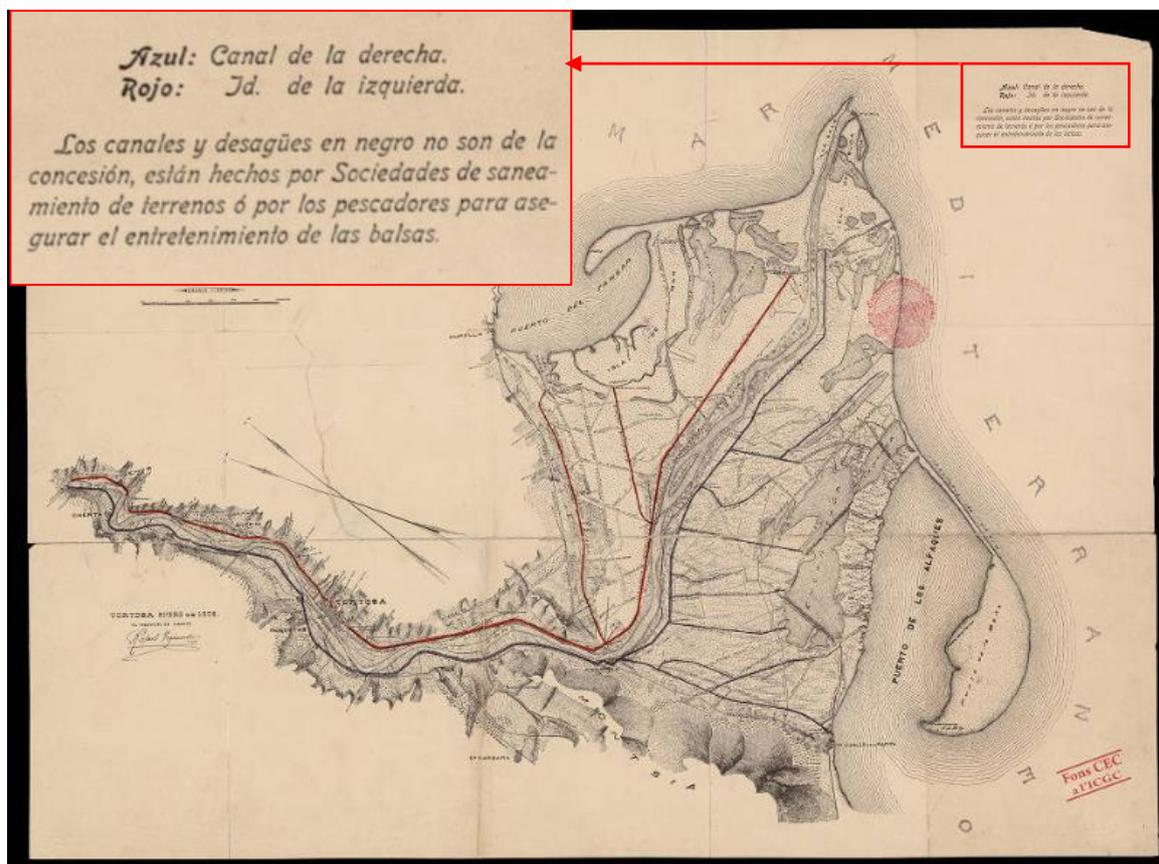


Figura 3.1.7. Establecimiento de Riegos desde la toma de Cherta al Mediterráneo. Tortosa, enero de 1908. El ingeniero de caminos Rafael Izquierdo. Fuente: ICGC (2020)

Por otro lado, también encontramos aquí un claro ejemplo de infraestructura azul (aquella vinculada al ciclo del agua), con la presencia de unos humedales artificiales de depuración del delta del Ebro (parte de la Red Natura 2000). Se trata de unos sistemas naturales de depuración de las aguas utilizadas en el cultivo del arroz, que contienen a menudo sólidos en suspensión, nutrientes (sobre todo fósforo y nitrógeno) y

otros químicos derivados del uso de fertilizantes y pesticidas. Estos humedales funcionan con una diversidad de ambientes, que se han creado con zonas a diferentes profundidades y con pendientes en los márgenes, así como con plantaciones de especies helofíticas dentro del humedal y árboles de ribera en las zonas marginales.

En concreto, hay dos humedales artificiales de depuración, el de Illa de Mar y el del Embut, construidos entre 2010 y 2012 por el entonces Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, dentro del "Programa de calidad de las aguas del Delta del Ebro", en el marco del Plan Integral de Protección del Delta del Ebro (Pipde). El de Illa de Mar (hemidelta izquierdo), tiene una superficie de casi 50 hectáreas, recibe en Deltebre las aguas del desagüe de Illa de Mar, y vierte el agua depurada en la bahía del Fangar. El del Embut (hemidelta derecho), ocupa unas 95 hectáreas, recibe en Amposta las aguas de los desagües de Riu Vell y Gossos, y vierte el agua depurada, en la laguna de la Encanyissada, desde donde circula hasta la bahía de los Alfacs. Los humedales pueden tener beneficios directos o indirectos para las actividades económicas y sociales locales: el cultivo del arroz, la producción de marisco en las bahías, la pesca, el turismo familiar u ornitológico, las actividades educativas (Agbar, 2021).

Para la señalización del borde costero, en el año 1864 se construyeron tres faros de hierro, que se situaron en la Punta del Fangar, en la isla de Buda y en la Punta de La Banya. El mar destruyó el faro de Buda en 1960. El del Fangar fue sustituido varias veces, hasta llegar al actual y pictórico faro de hormigón (Figura 3.1.8.). De los faros de hierro originales sólo queda el de Punta de La Banya, que fue trasladado de su emplazamiento original y situado en el Dique de Levante del Puerto de Tarragona (Departamento de Medio Ambiente y Vivienda., 2020).



Figura 3.1.8. Faro de hormigón del Fangar. Fuente: <https://www.freepik.es/>

El llamado Faro de Tortosa se localiza a continuación del Faro del Fangar (Figura 3.1.9.), que fue construido en 1983 y que vino a sustituir al emblemático Faro de Buda. Se trata de una estructura metálica situada a unas 3 millas mar adentro de la desembocadura del río Ebro y cuya misión es alertar a los navegantes las proximidades de los arenales y tierras bajas del delta del río, apenas perceptibles desde el mar (Autoridad Portuaria de Tarragona, 2021).

Siguiendo el recorrido de la costa hacia el sur, nos encontramos el actual Faro de la Banya, con torre de hormigón armado, de 23,7 m de altura y 3 m de diámetro. Y finalmente, el Faro de San Carlos de la Ràpita, de una sola planta en cuya azotea se levanta una linterna sobre un pequeño torreón de apenas 1 m de altura, que fue construido con el propósito de marcar durante la noche la entrada del puerto natural dels Alfaqs (Autoridad Portuaria de Tarragona, 2021).

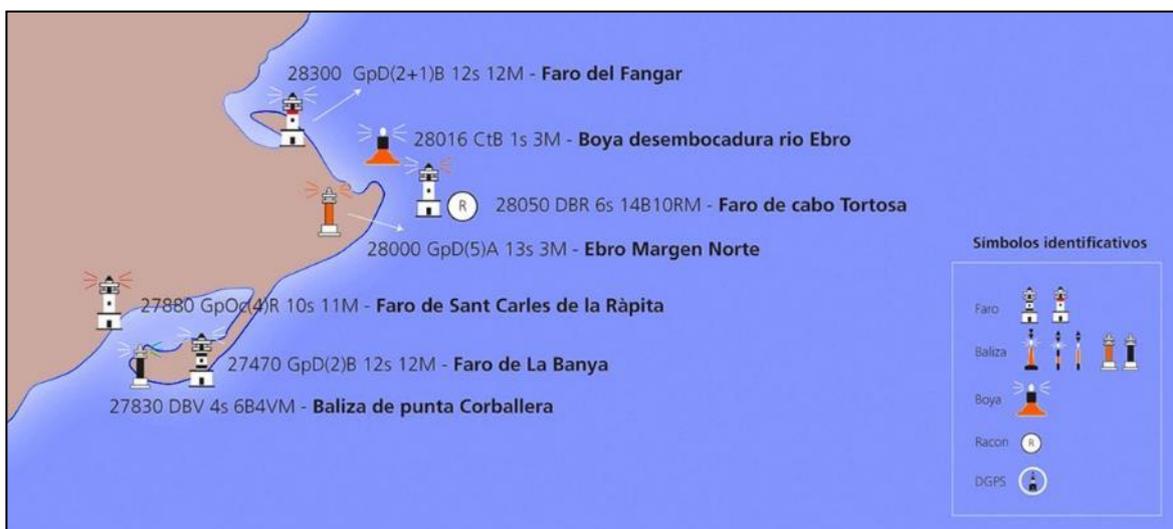


Figura 3.1.9. Faros y balizas en el Delta del Ebro. Fuente: Autoridad Portuaria de Tarragona (2021).

Las principales vías de comunicación por tierra están constituidas por carreteras y ferrocarril. Éste último lo constituye la línea de Barcelona a Valencia, que pasa por las estaciones de Amposta, Camarles y l’Ampolla. En cuanto a las principales carreteras, se trataría de la autopista A-7, de Barcelona a Valencia, y la carretera nacional N-340, de Barcelona a Valencia, que bordea el delta y atraviesa l’Ampolla, Camarles, l’Aldea, Amposta y Sant Carles de la Ràpita.

El río Ebro se puede cruzar por el Puente El Pasador, que une las poblaciones de Sant Jaume d’Enveja (Montsià) y Deltebre (Baix Ebre). Con 250 metro de longitud y 19 metros de anchura, permite la circulación de vehículos a motor, peatones y ciclistas. Es el último puente sobre el río Ebro antes de la desembocadura. También existen transbordadores públicos entre Sant Jaume d’Enveja y Deltebre, que atraviesan el río Ebro con personas y vehículos; así como transbordadores privados a la Isla de Buda. Los embarcaderos en el río Ebro se sitúan en Amposta, Deltebre y Sant Jaume d’Enveja (Ports de la Generalitat, 2021).

Los principales puertos, de norte a sur, serían el Puerto de l’Ampolla, el Puerto de Deltebre y el Puerto de Sant Carles de la Ràpita (Ports de la Generalitat, 2021). Cabe mencionar también la existencia de un puerto natural en la Punta del Fangar, el Puerto Natural del Fangar, en la cara norte del Delta del Ebro, donde sólo pueden entrar barcos de poco calado. El otro puerto natural se localiza al sur del delta, en la Bahía dels Alfaqs, entre la Punta de la Banya, la Barra del Trabucador y la costa de Sant Carles de la Ràpita; este espacio marítimo constituye el puerto natural más grande de Europa (Diputació de Tarragona, 2021).

3.2 Usos y actividades en medio marino.

El medio marino da soporte a un conjunto de usos y actividades que requieren una utilización del espacio marítimo, bien sea de manera temporal o permanente. Para facilitar el desarrollo sostenible y ordenado

de estos usos y actividades – lo que se conoce como economía azul – se ha establecido un marco legal a partir de la [*Directiva 2014/89/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de julio de 2014, por la que se establece un marco para la ordenación del espacio marítimo*](#) y de su transposición a través del *Real Decreto 363/2017, de 8 de abril, por el que se establece un marco para la ordenación del espacio marítimo*. Esta normativa relativa a la Ordenación del Espacio Marítimo (OEM en adelante) pretende ser la herramienta de referencia para el crecimiento sostenible de las economías marítimas, la utilización y aprovechamiento sostenible de los espacios y recursos marinos -teniendo en cuenta las interacciones entre tierra y mar-, y la mejora de la cooperación transfronteriza, pues se trata de un ámbito de actuación que trasciende las competencias nacionales.

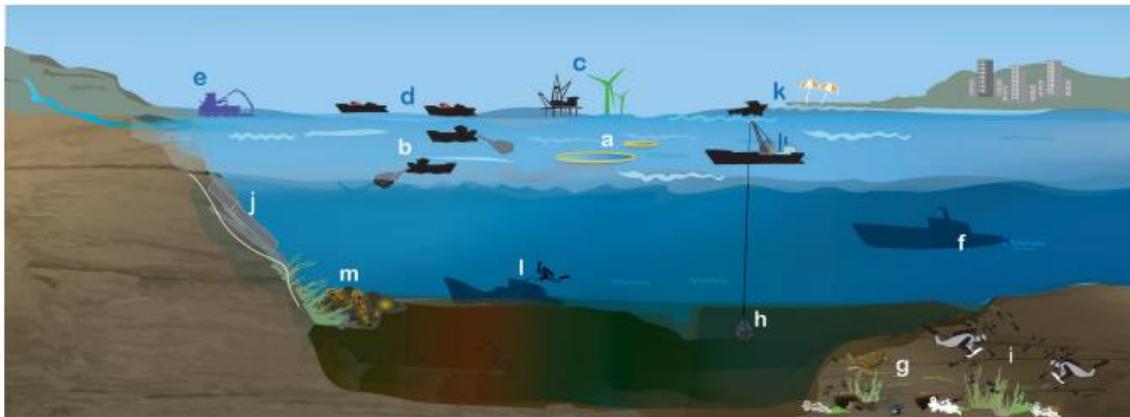


Fig. 3.2.1. Usos y actividades susceptibles de ser consideradas en los POEM. Fuente: MITECO, 2019.

En España, la normativa establece que se deberán elaborar **cinco** Planes de Ordenación del Espacio Marítimo (POEM), uno por cada una de las cinco demarcaciones marinas establecidas en la *Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de protección del medio marino*. El ámbito espacial de los POEM es el correspondiente a las demarcaciones marinas y, por tanto, abarca las aguas costeras que no hayan sido reguladas específicamente por los planes hidrológicos de cuenca, pero excluye las aguas de transición y las aguas costeras en aquellas cuestiones ambientales que hayan sido objeto de los planes hidrológicos y las superficies ocupadas por las zonas de servicio de los puertos existentes (zonas I y II en el caso de los Puertos del Estado). En el entorno del Delta del Ebro, que pertenece a la Demarcación Marina Levantino-Balear, el alcance provisional del POEM correspondiente se puede apreciar en la figura 3.2.2.

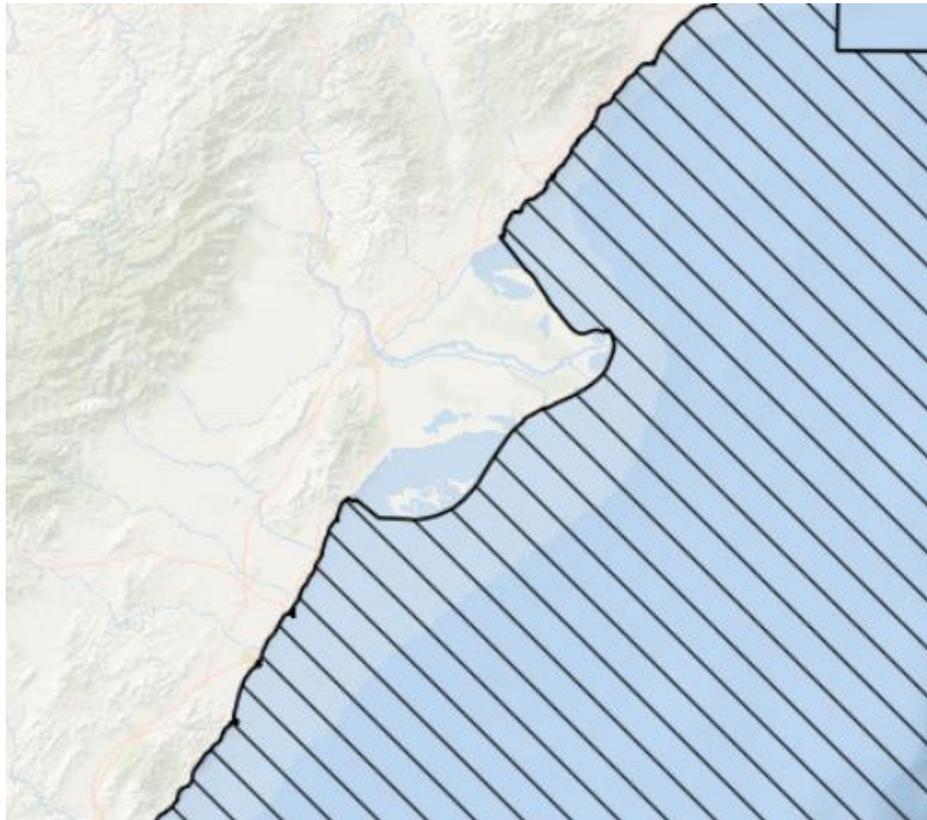


Fig. 3.2.2. Ordenación del Espacio Marítimo (OEM) provisional en el entorno del Delta del Ebro (Demarcación Levantino-Balear). Fuente: InfoMAR (CEDEX).

En los **POEM** se establecerá la distribución espacial y temporal de las correspondientes actividades y usos, existentes y futuros, de las aguas marinas españolas. En el ámbito de la Demarcación Marina Levantino-Balear, y en particular en el área de influencia del Delta del Ebro, se han identificado los siguientes usos y actividades (figura 3.2.1.):

- a. Acuicultura (peces y moluscos);
- b. Pesca extractiva;
- c. Instalaciones e infraestructuras para la prospección, explotación y extracción de hidrocarburos
- d. Instalaciones e infraestructuras para la producción de energía procedente de fuentes renovables;
- e. Transporte y tráfico marítimo;
- f. Zonas de vertido (dragados portuarios y aguas de depuración);
- g. Zonas e instalaciones de interés para la Defensa Nacional;
- h. Actividades turísticas, recreativas, culturales y deportivas;

3.2.1 Acuicultura (peces y moluscos)

En la Demarcación marina levantino-balear se contabilizaban en 2016 un total de 242 instalaciones de acuicultura, lo que supone un 6% de las instalaciones que había en España en ese año. En esta demarcación la mayoría de instalaciones (174) se sitúan en aguas de transición, mientras que el número se reduce en aguas costeras (60) y es muy escaso en tierra (8). El 87% del total de las instalaciones de la demarcación se dedican fundamentalmente al cultivo de moluscos, mientras que solamente el 13% de las existentes se dedica a la producción de peces, no existiendo el cultivo de crustáceos o plantas acuáticas (MITECO, 2019). A pesar del porcentaje relativo de instalaciones dedicadas a uno u otro cultivo, en

términos de producción la cría de moluscos es todavía bastante inferior al cultivo de peces en la demarcación. De acuerdo con los datos de 2016, la producción de peces alcanzó las 27.402 tn, lo que equivale a casi un 57% de la producción total de peces de agua salada y salobre en España, mientras que la cría de moluscos alcanzó las 5.431 toneladas -teniendo en cuenta todas las especies cultivadas-, lo que supone solamente el 2,4% del total de moluscos producidos en España empleando agua de mar y en zona intermareal salobre (MITECO 2019).

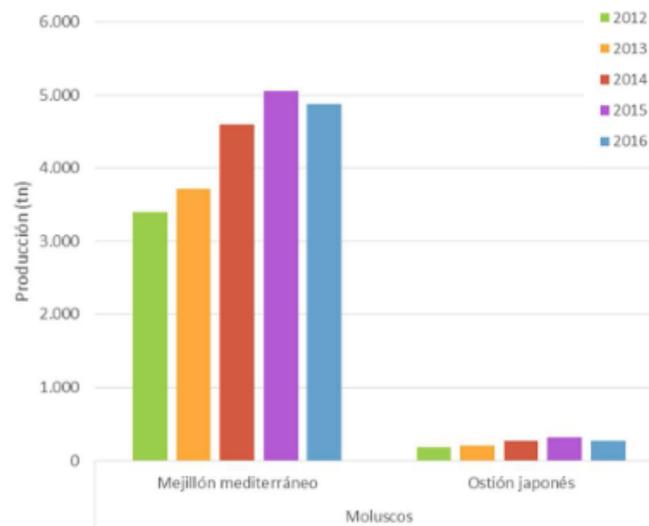


Fig. 3.2.3. Producción de moluscos en fase de cultivo de engorde a talla comercial en aguas costeras y de transición en la demarcación marina levantino-balear (MITECO, 2019).

No obstante, en el caso del Delta del Ebro, la cría de moluscos es el cultivo predominante, fundamentalmente el mejillón mediterráneo (*Mytilus galloprovincialis*) y en menor medida el ostión japonés u ostra del Delta (*Magallana gigas*) (fig. 3.2.4). De hecho, como se aprecia en la figura 3.2.5, se trata de la zona más extensa de producción de moluscos en aguas costeras y de transición, y, además, se encuentra declarada como zona de protección de especies acuáticas significativas desde un punto de vista económico (moluscos) en el plan hidrológico vigente de la Demarcación del Ebro (2015-2021).



Fig.

3.2.4. Cultivos marinos predominantes en el Delta del Ebro: i. mejillón mediterráneo (*Mytilus galloprovincialis*) y ii. ostión japonés u ostra del Delta (*Magallana gigas*). Fuente: www.rodolpesca.com y <https://terresdelebre.travel>.

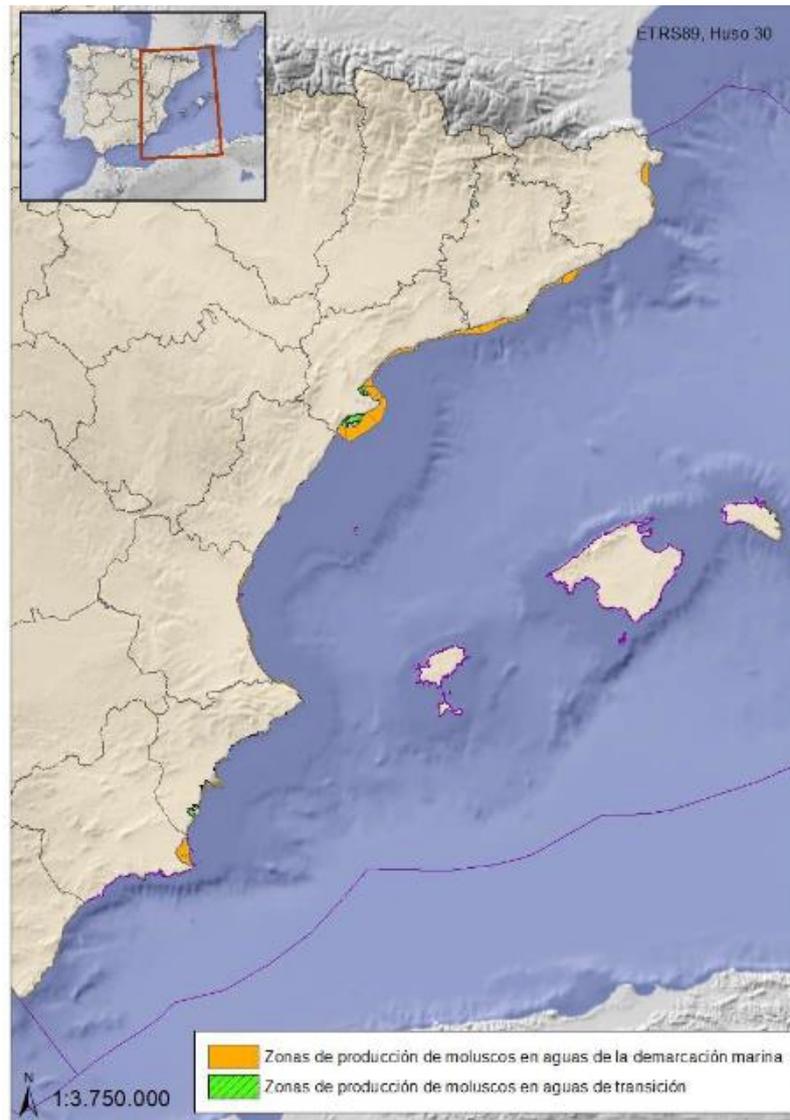


Fig. 3.2.5. Ubicación de las zonas de producción de moluscos de la demarcación marina levantino-balear (MITECO, 2019)

En cuanto a la tipología de las instalaciones, la forma predominante de cultivo es la batea fija, con numerosas concesiones tanto en la Bahía de El Fangar y Golfo de L´Ampolla como en la Bahía de Els Alfacs. Existen además dos parques de cultivo: uno de bateas fijas (Polígono de bateas Bahía Fangar) y otro sobre bancos naturales sobreelevados (Parque de cultivo de La Baña).



- Bancos naturales cultivados sobreelevados; Parque de cultivo
- Bateas fijas
- Bateas fijas; Long-line
- Bateas fijas; Parque de cultivo
- Jaulas flotantes; Jaulas sumergidas

Fig. 3.2.6. Instalaciones de acuicultura en el entorno del Delta del Ebro. Fuente: InfoMAR (CEDEX).

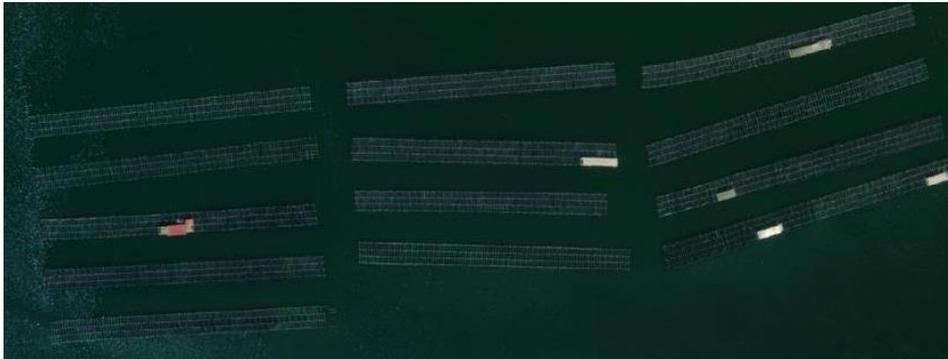


Fig. 3.2.7. Bateas fijas en el Polígono de bateas Bahía Fangar. Fuente: Acuivisor, MAPA.

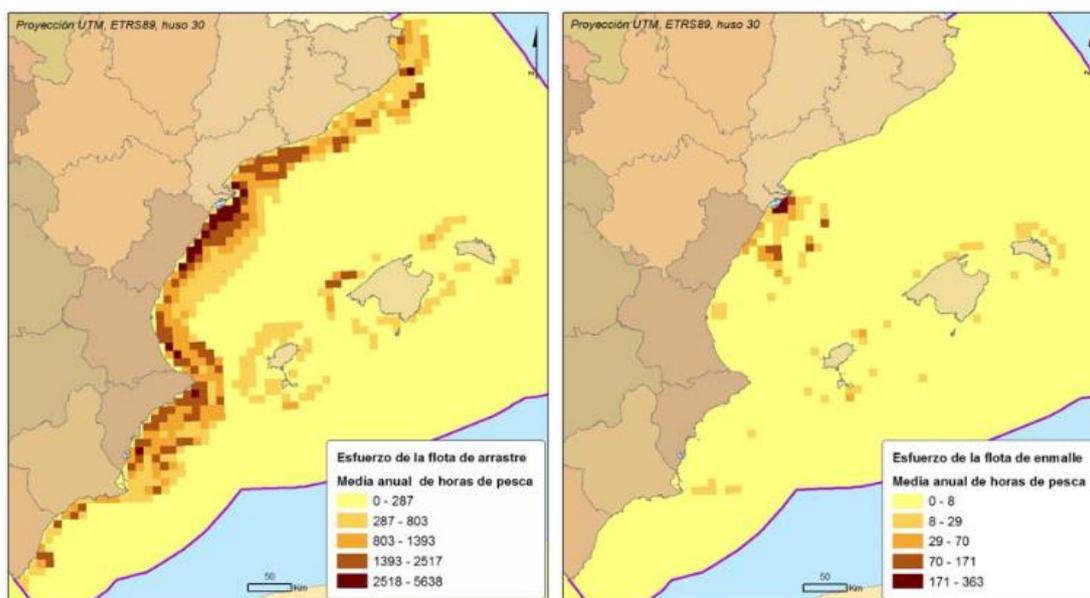


Fig. 3.2.8. Zona ocupada por las bateas fijas en el Polígono de Bahía Fangar. Fuente: Acuivisor, MAPA.

3.2.2 Pesca extractiva

La actividad pesquera en España es un sector dinámico y tradicional, de gran relevancia económica y social, que ha desarrollado a lo largo del tiempo una de las flotas pesqueras más importantes del mundo. No obstante, la pesca representa una importante presión sobre las comunidades biológicas del medio marino, ya que el exceso de capturas o sobrepesca puede degradar tanto las poblaciones de las especies comerciales (tamaño y estructura) como las de otras especies no-objetivo, pero también puede alterar y degradar sus hábitats según el tipo de arte que se emplee en su extracción (MITERD, 2021).

En la Demarcación levantino-balear, las principales artes pesqueras son el arrastre de fondo, al que se dedica mayor esfuerzo, y el cerco. Si bien la flota de arrastre es la predominante en el entorno del Delta, cabe destacar que también existe un importante esfuerzo pesquero de la flota de enmalle, siendo la zona más importante para faenar con este tipo de flota en la demarcación. A continuación se muestra el detalle de la distribución espacial de la pesca marítima (arrastre de fondo y enmalle) en la demarcación (figura 3.2.9), que refleja un análisis espacial del esfuerzo pesquero, para cada tipo de arte, realizado a partir de datos VMS (*Vessel Monitoring System*) y los libros de pesca del periodo 2007 – 2010 (MITERD, 2021).



3.2.3 Instalaciones e infraestructuras para la prospección, explotación y extracción de hidrocarburos

La investigación, exploración y extracción de petróleo y gas en el medio marino (*offshore*) consiste en detectar los entrapamientos o estructuras geológicas en las cuales puedan haber quedado retenidos los hidrocarburos y la explotación de estos recursos fósiles. Para ello se realizan estudios geológicos y geofísicos – fundamentalmente estudios de sísmica marina– con la finalidad de localizar la ubicación exacta para emplazar la perforación de un sondeo. Si el resultado del sondeo es positivo, se ha de efectuar una evaluación del potencial del posible yacimiento, poniéndolo finalmente en producción si la evaluación ha resultado favorable (Actividades Humanas en los Mares de España, 2008). Esta actividad considera tanto la extracción de petróleo y gas del subsuelo marino, como las infraestructuras que son

necesarias tanto para la extracción como para el transporte hasta tierra. Incluye también los distintos permisos que pudiesen existir en la demarcación, de exploración o explotación, solicitados o vigentes, así como las campañas sísmicas y los sondeos de prospección que se hayan realizado en la fase de exploración (MITECO, 2019).

En la Demarcación levantino-balear se encuentra la única explotación de crudo en el mar existente en España. Frente a las costas de Tarragona existe una serie de pozos localizados en diferentes concesiones, siendo Casablanca la más representativa. Desde esta instalación se extraen alrededor de 2.000 barriles de crudo al día, tanto del yacimiento Casablanca como de otros pozos, entre los que cabe destacar Rodaballo (en funcionamiento desde 1996), Boquerón (desde 1997) y Montanazo-Lubina (desde 2012) (MAGRAMA, 2012). En esta zona también existen permisos de investigación (Lubina 1 y Lubina 2) y se ha solicitado un permiso de investigación (Medusa) para un área extensa que amplía las explotaciones y permisos vigentes hacia el área de influencia del Delta (fig. 3.2.10) (MITERD, 2021).

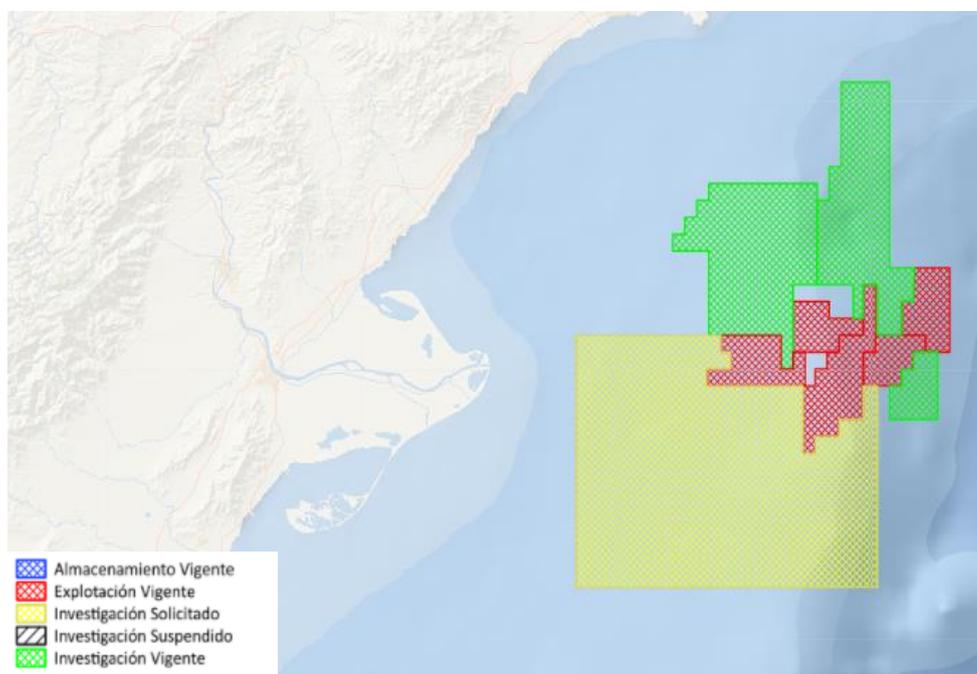


Fig. 3.2.10. Concesiones para la exploración, explotación y extracción de hidrocarburos. Actualizado a 2019.
Fuente: InfoMar (CEDEX).

En cuanto a sondeos exploratorios, no se ha realizado ninguno en la demarcación en este segundo ciclo de la Estrategia Marina. Se realizaron dos perforaciones en el anterior ciclo, en los permisos Montanazo y Lubina-2, que han dado lugar a los pozos antes mencionados (MITECO, 2019). Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 3.2.11, existen sondeos históricos en las proximidades del Delta y su área de influencia, y son numerosos en esta zona de la demarcación levantino-balear.

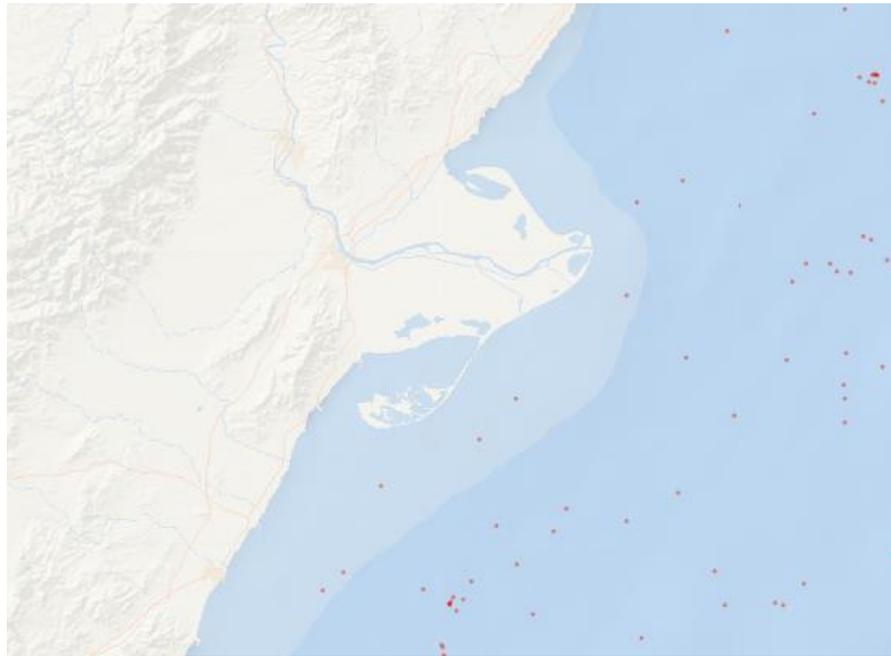


Fig. 3.2.11. Sondeos de energías fósiles. Fuente: InfoMar (CEDEX).

Respecto a la producción de crudo en el conjunto del yacimiento, en el primer ciclo de la Estrategia Marina la tendencia era negativa, sin embargo, se ha revertido en el segundo ciclo por la entrada en funcionamiento de los pozos Montanazo-Lubina. La producción media anual para el periodo 2011-2016 se ha estimado en 215.000 toneladas, lo que supone aproximadamente un 96% de lo producido en ese periodo en toda España (MITECO, 2019).

En lo relativo al gas natural, en esta demarcación se ha llevado a cabo también el intento de puesta en funcionamiento un almacenamiento subterráneo de gas en el antiguo yacimiento de petróleo Amposta. La concesión de explotación Castor, situada a unos 20 km de Vinarós (Castellón), fue otorgada en 2008. En 2012, tras la construcción de la plataforma y el gasoducto de 30 km – 22 km en el mar y 8 km en tierra -, se iniciaron los trabajos de puesta en funcionamiento del almacén con las primeras inyecciones de gas. La aparición de actividad sísmica derivó en el cese de actividad de la plataforma en septiembre de 2013 (MITECO, 2019).



Fig. 3.2.12. Localización del gasoducto y la plataforma de gas. Fuente: InfoMar (CEDEX).

3.2.4 Instalaciones e infraestructuras para la producción de energía procedente de fuentes renovables

En España, la producción de energías renovables marinas es todavía un sector embrionario, con una actividad centrada en la investigación y desarrollo de prototipos que no han abordado la fase de comercialización. De hecho, las únicas instalaciones existentes están destinadas a la investigación y su producción no se considera relevante al compararla con el total de energía renovable en tierra (MITERD, 2021).

Según el Plan de Energías Renovables 2011-2020 (IDAE, 2011) el recurso energético existente en el mar y, por tanto, susceptible de ser aprovechado en el futuro se manifiesta de distintas formas:

- Viento (energía eólica)
- Oleaje (energía de las olas o undimotriz),
- Mareas (energía mareomotriz)
- Diferencia de temperaturas o gradientes térmicos (energía mareotérmica)
- Diferencia de salinidad (energía azul o potencia osmótica).

Esta diversidad de recurso, da lugar a numerosas tecnologías claramente diferenciadas para el aprovechamiento del mar.

En la Demarcación marina levantino-balear no existe en la actualidad ninguna actividad de generación de energías renovables. Sin embargo, en 2009 se llevó a cabo el “Estudio Estratégico del Litoral Español para la Instalación de Parques Eólicos Marinos” (Ministerio de Industria, Comercio y Turismo), un análisis preliminar enfocado al recurso eólico en el mar u *offshore*. Este estudio, que no se ha actualizado para este segundo ciclo de la Estrategia Marina, proponía una zonificación del litoral en función de si las zonas eran aptas o no (zonas de exclusión), o si tenían algún tipo de condicionante para su instalación (MITERD, 2021). Como se puede apreciar en la figura 3.2.13, el entorno del Delta del Ebro se encuentra en una de estas zonas de exclusión. No obstante, frente a las costas del Delta, ya en el mar territorial, la zona se consideraba apta con condicionantes. De hecho, de acuerdo con el estudio “Análisis del recurso. Atlas

eólico de España” (2011), coordinado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), los niveles del recurso eólico en el entorno del Delta oscilan entre medio-bajo (5 – 6,5 m/s), medio-alto (6,5 - 8 m/s) y alto (> 8 m/s), como se puede observar en la figura 3.2.14.

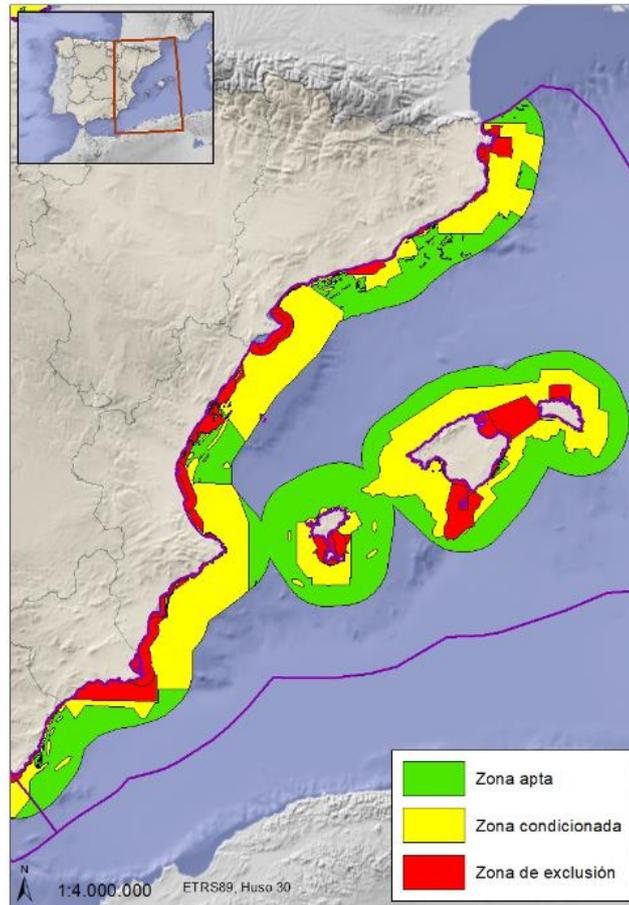


Fig. 3.2.13. Zonificación del litoral para la instalación de parques eólicos offshore. Fuente MITECO, 2019.

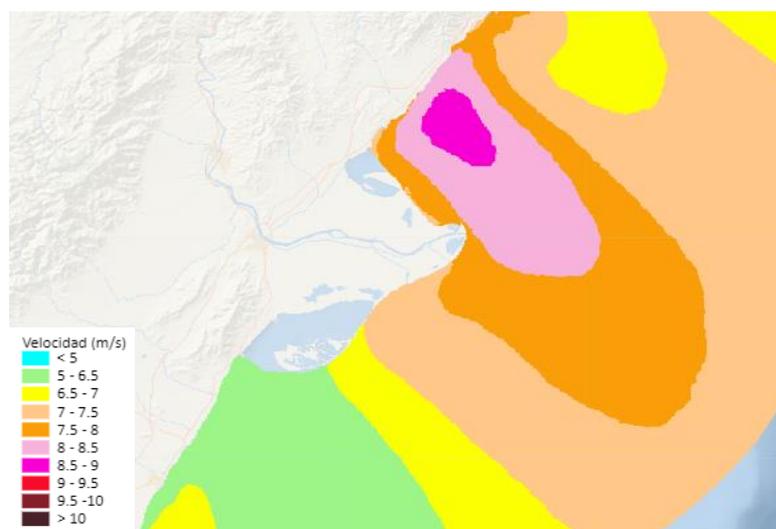


Fig. 3.2.14. Niveles del recurso eólico en el entorno del Delta del Ebro. Fuente: InfoMar (CEDEX).

De forma análoga al estudio centrado sobre el recurso eólico, también se publicó en 2011 un estudio para el análisis del potencial de la energía de las olas en el litoral español (IDAE, 2011). En este caso, la potencia media anual que se estima que produciría la energía undimotriz en el Delta del Ebro no es relevante en el ámbito de la Demarcación Levantino-Balear (fig. 3.2.15).

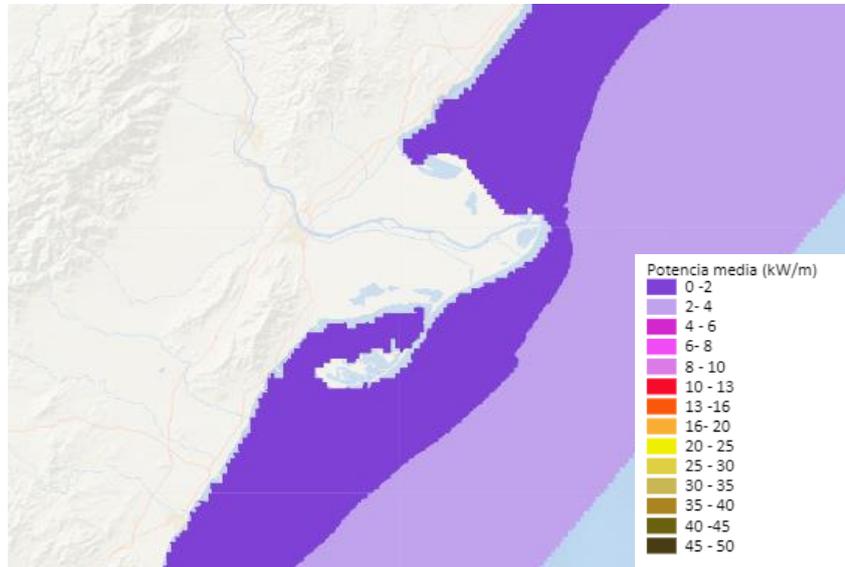


Fig. 3.2.15. Potencia media anual de la energía undimotriz en el entorno del Delta del Ebro. Fuente: InfoMar (CEDEX).

3.2.5 Transporte y tráfico marítimo

Por transporte marítimo se entiende la actividad económica cuyo fin es transportar por mar mercancías y/o personas desde un punto de origen hasta el puerto o lugar de destino. En el caso del tráfico marítimo en sentido amplio, este engloba a toda actividad de navegación que ocurra en el ámbito de la demarcación, incluyendo los buques pesqueros, que navegan hacia los caladeros o zonas de pesca, durante la práctica de la pesca o los barcos de salvamento marítimo (MITERD, 2021).

Para evaluar la intensidad de esta actividad en la demarcación uno de los indicadores seleccionados en las estrategias marinas es la densidad de tráfico marítimo, que se calcula utilizando datos AIS facilitados por SASEMAR (año 2016), considerando todos los buques que circulan por ella, independientemente de dónde esté localizado el puerto de origen o destino (MITECO, 2019). Como se aprecia en la figura 3.2.16, la densidad de tráfico marítimo en el entorno del Delta para verano (julio-septiembre) de 2016, no fue elevada, exceptuando alguna zona concreta.

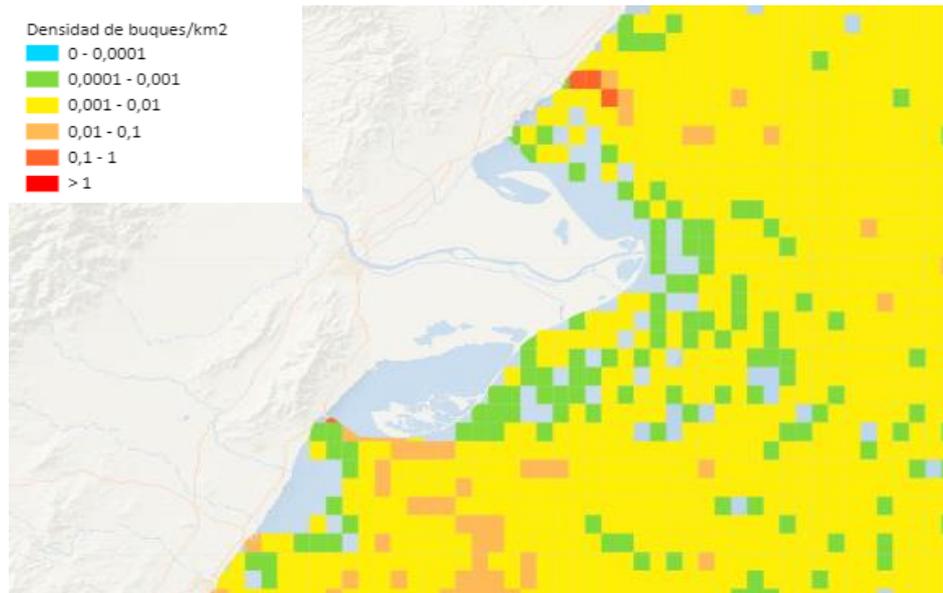


Fig. 3.2.16. Densidad media de buques de todo tipo durante el verano de 2016. Fuente: InfoMar (CEDEX).

Entre los distintos tipos de buques, cabe destacar la densidad de tráfico marítimo de barcos clasificados como especiales. El tráfico se concentraba en esa fecha, además de en el entorno de los puertos, en las plataformas Casablanca y Castor (fig. 3.2.17), lo que puede ejercer cierta presión en el entorno del Delta. En cuanto a los buques pesqueros con disponibilidad de datos AIS (eslora > 15 m), la densidad de tráfico es prácticamente idéntica a la densidad media del conjunto de todos los buques, por lo que se infiere que este tipo de buques conforman el grueso del tráfico en el entorno del Delta (fig. 3.2.18) (MITECO, 2019).



Fig. 3.2.17. Densidad de buques especiales en verano de 2016. Fuente: MITECO, 2019.

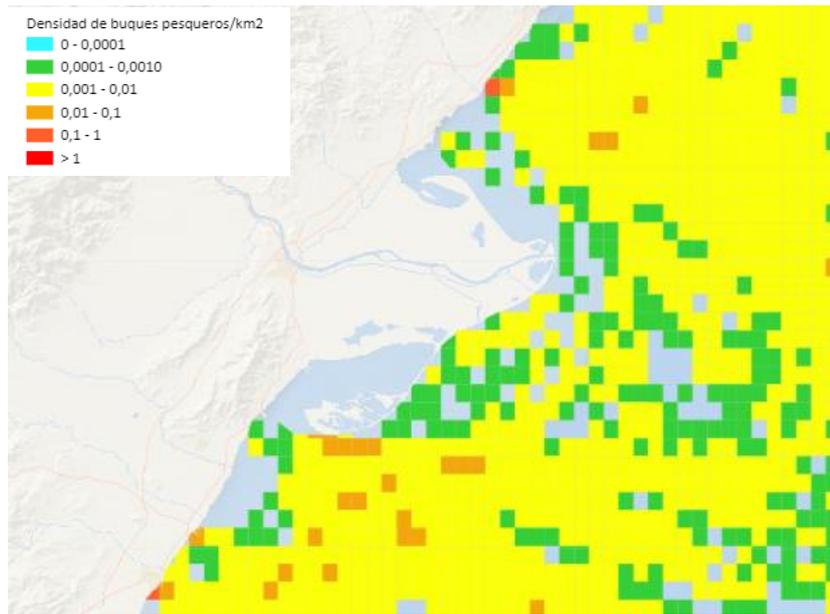


Fig. 3.2.18. Densidad de buques pesqueros durante el verano de 2016. Fuente: InfoMar (CEDEX).

3.2.6 Zonas de vertido

3.2.6.1 Dragados portuarios

En el ámbito marino, de acuerdo con la legislación vigente en España, pueden realizarse dragados portuarios necesarios para la construcción o mantenimiento de puertos y vías de navegación. Los sedimentos procedentes de dragados portuarios pueden utilizarse tanto en la misma zona portuaria donde han sido extraídos (rellenos portuarios), en otras zonas para diversos usos (regeneración de playas, usos agrícolas, relleno de zonas húmedas, etc.) o bien pueden verterse al mar (MITERD, 2021).

En el entorno del Delta del Ebro existe un punto relativamente próximo de vertido de dragado portuario, con un volumen estimado entre 50.000 y 100.000 m³ para el periodo 2011-2016 según los datos notificados a los convenios internacionales de protección del medio marino. En el ámbito de la demarcación marina levantino-balear esta cifra ascendió a 1,3 millones de m³ en ese mismo periodo (MITECO, 2019).



Fig. 3.2.19. Zonas de vertido de material dragado en el entorno del Delta 2011-2016. Fuente: InfoMar (CEDEX).

3.2.6.2 Saneamiento, depuración y calidad de aguas de baño

Las aguas marinas son las receptoras finales tanto de vertidos directos como de los que, de forma indirecta, llegan a través de los ríos y otros cursos fluviales intermitentes. Los contaminantes presentes en estos vertidos pueden afectar a los ecosistemas marinos. En el caso de los vertidos de aguas residuales urbanas, este tipo de vertidos puede tener un impacto significativo sobre la calidad de las aguas de baño (MITERD, 2021).

Como se puede apreciar en la figura 3.2.20, existen numerosas estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR) que pueden afectar directa o indirectamente la calidad de las aguas de transición y costeras que se encuentran en el área de influencia del Delta. El número de habitantes equivalentes (h-eq) calculado para las EDAR del Delta oscila entre 2000 en ciertas zonas y 150.000 h-eq en las EDAR que configuran el eje Tortosa-Amposta-Sant Carles de la Ràpita, lo que puede ejercer una presión significativa, tanto en la zona de desembocadura como en el hemidelta sur (MITERD, 2021).

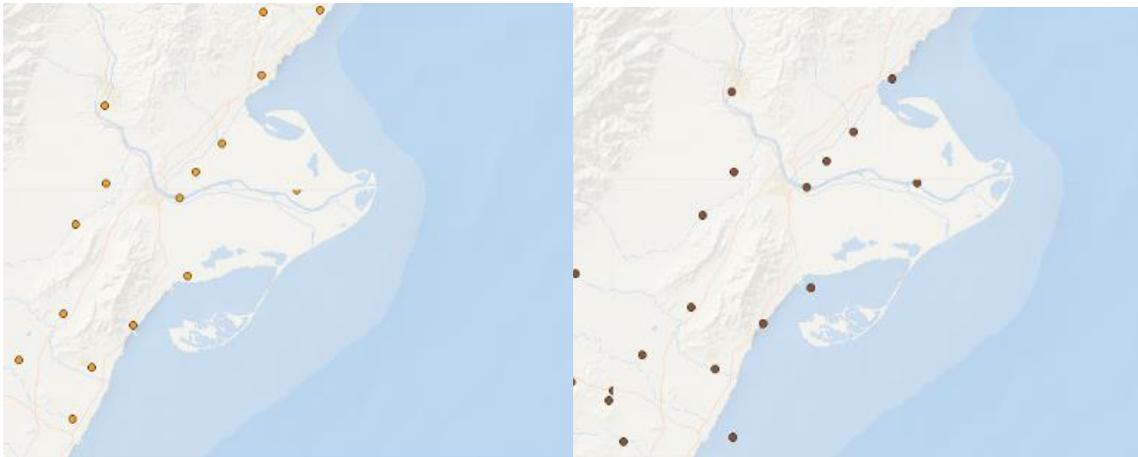


Fig. 3.2.20. Ubicación de las i) estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR) y de los ii) puntos de vertido en las aglomeraciones urbanas del entorno del Delta del Ebro. Fuente: InfoMar (CEDEX).

En cuanto a las zonas sensibles, desde 2002 están declaradas dos zonas en el Delta del Ebro: Delta del Ebro I (El Fangar) y Delta del Ebro II (Alfacs) (fig. 3.2.21). Estas zonas se han mantenido en la *Resolución de 6 de febrero de 2019, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente, por la que se declaran las zonas sensibles en las cuencas intercomunitarias*. Este hecho impone la obligación de someter a un tratamiento de depuración más riguroso que el secundario que permita la eliminación tanto de nitrógeno como de fósforo a todos aquellos vertidos de aguas residuales urbanas procedentes de aglomeraciones urbanas de más de 10.000 h-eq, esto es, en las aglomeraciones de Tortosa-Roquetes y Deltebre (Delta del Ebro I), y Amposta y Sant Carles de la Ràpita (Delta del Ebro II).

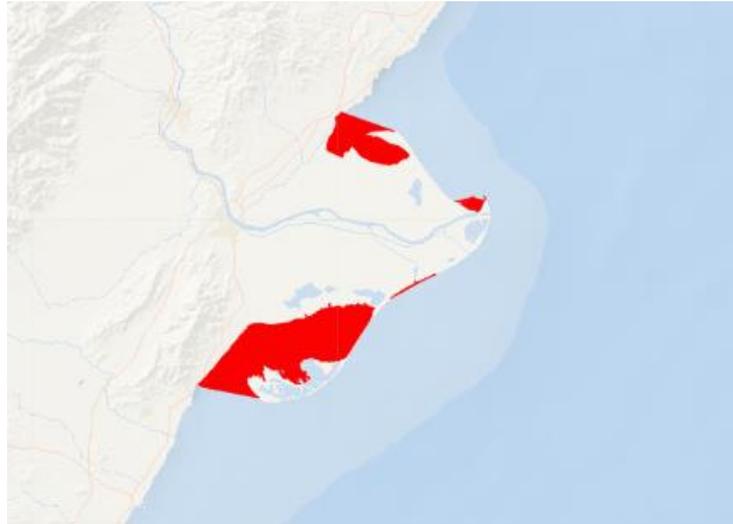


Fig. 3.2.21. Ubicación de las zonas sensibles en el entorno del Delta del Ebro. Fuente: InfoMar (CEDEX).

Además de los vertidos de aguas residuales urbanas, también los vertidos de carácter industrial pueden tener un impacto significativo en la calidad de las aguas marinas y sobre los ecosistemas. Las CCAA tienen la competencia en la autorización de los vertidos desde tierra al mar, para los que se establecen límites de emisión de los distintos contaminantes en consonancia con el cumplimiento de los objetivos ambientales. El Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (Registro PRTR) incluye información de vertidos desde tierra producidos por instalaciones que superan los umbrales que se especifican en el *Real Decreto 508/2007, de 20 de abril, por el que se regula el suministro de información sobre emisiones del Reglamento E-PRTR y de las autorizaciones ambientales integradas*. En 2017 en el entorno del Delta solo se ha identificado un complejo PRTR que vierte al litoral y que puede afectar a la calidad de las aguas (MITECO, 2019).

Por último, a pesar de las presiones que recibe el Delta por diferentes tipos de vertidos, la calidad de las aguas de baño en los puntos de muestreo establecidos para el año 2019 (datos del Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social) es mayoritariamente excelente, como se puede apreciar en la figura 3.2.22.



Fig. 3.2.22. Calidad de agua en zonas de baño de acuerdo con los datos de 2019 procedentes del Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social. Fuente: InfoMar (CEDEX).

3.2.7 Zonas e instalaciones de interés para la Defensa Nacional

Determinadas instalaciones militares y zonas de ejercicios permanentes para la instrucción y adiestramiento operativo de unidades de las Fuerzas Armadas deben estar disponibles sin perturbaciones en todo momento para garantizar el cumplimiento de las misiones asignadas a las Fuerzas Armadas en la *Ley Orgánica 5/2005, de 17 de noviembre, de la Defensa Nacional*. Estas instalaciones y espacios constituyen las zonas de interés para la Defensa Nacional, recogidas la *Ley 8/1975, de 12 de marzo, de zonas e instalaciones de interés para la Defensa Nacional*, y son definidos como áreas terrestres, marinas o aéreas que constituyen o puedan constituir una base permanente a un apoyo eficaz de las acciones ofensivas o defensivas necesarias. En el área de influencia del Delta del Ebro no existen zonas de interés para la defensa nacional. Sin embargo, existe una zona permanente de ejercicios en superficie (fig. 3.2.23). Estas zonas se constituyen como complemento a las zonas de interés para llevar a cabo ejercicios militares de diferente naturaleza. El uso de estas zonas, de actividad no permanente, no suele superar los 170 días al año (MITERD, 2021).

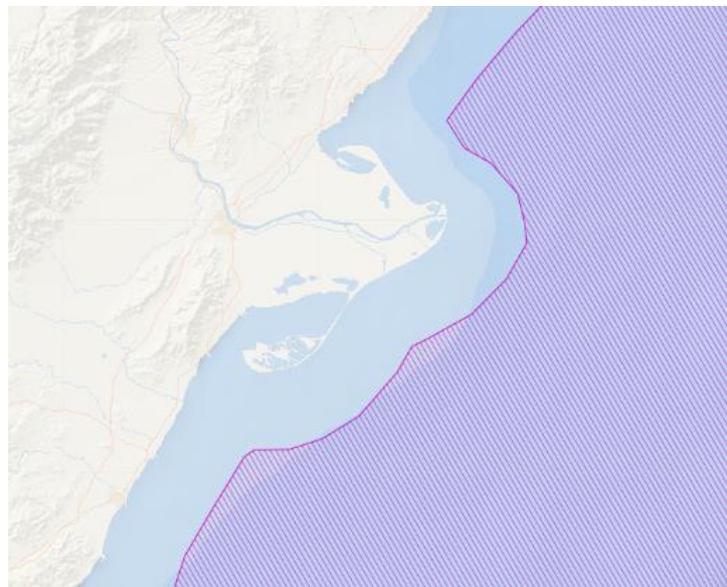


Fig. 3.2.23. Zonas permanentes de ejercicios en superficie de las Fuerzas Armadas en las proximidades del Delta del Ebro. Fuente: InfoMar (CEDEX).

3.2.8 Actividades turísticas, recreativas, culturales y deportivas

El turismo es, sin duda, una de las principales actividades económicas de España, siendo el más relevante el turismo costero, relacionado con el uso y disfrute del mar y las playas. Para fomentar el desarrollo de esta actividad se han construido toda una serie de infraestructuras en las inmediaciones de la ribera del mar que facilitan tanto la pernoctación de los turistas como la práctica de actividades en el dominio público marítimo-terrestre (DPMT). Este tipo de actividades ha ido aumentando y diversificándose en los últimos años, ofreciendo actividades como la navegación deportiva, los cruceros, los deportes náuticos (vela, surf, buceo, esquí acuático, etc.), el avistamiento de cetáceos y la pesca deportiva. Es importante señalar que para disfrutar de este tipo de ocio también se requiere la construcción de infraestructuras permanentes, principalmente puertos deportivos y zonas de fondeo reguladas, que pueden constituir una presión considerable sobre el medio marino (MITERD, 2021).

En la demarcación marina levantino-balear la “Guía de Playas” de 2017 de la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar recoge un total de 1.360 playas que cuentan con infraestructuras que

facilitan el uso y disfrute de las mismas, lo que supone un 38,5% del total de playas de España. En el entorno del Delta del Ebro existen multitud de playas, diez de ellas se localizan en el frente costero del Delta. Además existe un número similar en las poblaciones de L´Ampolla y Cap Roig (hemidelta norte) y Sant Carles de la Ràpita (hemidelta sur). Muchas de estas playas cuentan con alguno de estos servicios: paseos marítimos, aparcamientos, establecimientos de comida y de bebida y duchas.



Fig. 3.2.24. Playas en el entorno del Delta del Ebro incluidas en la Guía de Playas de 2017 de la DG de Sostenibilidad de la Costa y el Mar. Fuente: InfoMar (CEDEX).

Respecto a las infraestructuras para la práctica de la náutica recreativa, esto es los puertos deportivos y las playas con zonas de fondeo, existen en la demarcación un total de 150 puertos con instalaciones para barcos deportivos, que suman más de 72.000 amarres (MITECO, 2019). En el caso del Delta del Ebro, los puertos deportivos se localizan en la desembocadura (1), L´Ampolla (1) y Sant Carles de la Ràpita (2), mientras que las zonas de fondeo se distribuyen en la punta del Delta y en la zona de L´Amposta-Cap Roig. En el hemidelta sur no existen zonas de fondeo (fig 3.2.25).



Fig. 3.2.25. i) Puertos autonómicos y ii) playas que cuentan con zona de fondeo balizada en el entorno del Delta del Ebro. Fuente: InfoMar (CEDEX).

Además, en el área de influencia del Delta existen cuatro playas que disponen de una zona específica para la práctica del surf y son consideradas de especial interés para la práctica del surf (MITECO, 2019).



Fig. 3.2.26. Playas que cuentan con zona para la práctica del surf y rompientes de especial interés para la práctica de surf en el entorno del Delta del Ebro. Fuente: InfoMar (CEDEX).

4 Especies exóticas invasoras en el Delta del Ebro

El término de especies alóctonas (o exóticas) se refiere a organismos vivos, en cualquiera de sus fases de vida, que han sido introducidos por el ser humano, intencionadamente o no. Una vez introducidas, estas especies, que se encuentran fuera de su rango de distribución históricamente conocido y de su área potencial de dispersión natural, pueden o no sobrevivir y reproducirse en el medio natural de la nueva región que las acoge.

Cuando estas especies alóctonas logran establecerse y expandirse en el nuevo entorno, se trata de una colonización e invasión biológica considerándose como especies exóticas invasoras (EEI en adelante) (IUCN 2002, Evans *et al.* 2015). Estas especies alóctonas, que según su carácter invasor competirán en mayor o menor medida por los recursos disponibles y el hábitat, pueden generar un doble impacto negativo:

- **Ecológico.** El impacto en los ecosistemas y en las especies autóctonas puede llegar a ser muy notable y puede suponer una alteración de la distribución y crecimiento de otras especies de fauna y flora, desplazándolas y poniendo en riesgo el desarrollo de los procesos ecológicos que desempeñan estas poblaciones autóctonas adaptadas a las condiciones locales (García de Jalón, 2008), o simplemente por las alteraciones físico-químicas o ecológicas que causan en los hábitats que invaden. De hecho, la presencia de EEI es considerada una de las principales causas de pérdida de biodiversidad en España (Capdevila-Argüelles *et al.*, 2013).
- **Socio-económico.** El signo de este impacto puede ser neutro, perjudicial o incluso beneficioso a corto-medio plazo. No obstante, se debe considerar que la alteración de las redes ecológicas,



CEDEX

tanto en número de especies como en la calidad de los flujos, supone un desequilibrio en el ecosistema que limitará la capacidad de adaptación del mismo a nuevos escenarios. (CHE, 2020).

En el entorno del Delta del Ebro, la presencia de EEI es un problema importante que puede llegar a causar elevado impacto ecológico, social y económico. El número de EEI no es fácil de cuantificar, sin embargo, recientemente se ha cuantificado en torno a 200 EEI en el delta del Ebro (CHE, 2020), mientras que las citas recogidas en el Sistema de Información de las Especies Exóticas de Cataluña (EXOCAT) se estiman en torno al centenar de EEI diferentes. Independientemente de su número, las especies que tienen un mayor impacto son el caracol manzana (*Pomacea* spp.), el mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*), el cangrejo rojo (*Procambarus clarkii*), el cangrejo azul (*Callinectes sapidus*), la gambusia (*Gambusia holbrooki*), y la rana toro (*Lithobates catesbeianus*) (CHE, 2020), todas ellas incluidas, con excepción del cangrejo azul, en el Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras regulado por el *Real Decreto 630/2013, de 2 de agosto*, que es la herramienta legal que permite luchar contra la continua introducción y proliferación de especies exóticas invasoras y con potencial invasor en los ecosistemas españoles y permite la elaboración de estrategias de lucha, control y posible erradicación de las mismas, como la **Estrategia Nacional para el control del Mejillón Cebra (*Dreissena polymorpha*) en España** (septiembre de 2007). Dada la importancia que su presencia tiene en el delta del Ebro, estas especies se describen detalladamente a continuación:

- **Caracol manzana (*Pomacea* spp.)**

El grupo de especies que conforman lo que comúnmente se denomina caracol manzana (*Pomacea* spp.) presentan individuos de grandes dimensiones (hasta 15 cm) que habitan el medio acuático. Sus numerosas puestas de color rosáceo son aéreas y las deposita fuera del agua sobre superficies duras o vegetación acuática. Se trata de especies herbívoras de carácter muy voraz, lo que supone una gran amenaza para zonas de cultivos próximas a marismas, estanques o acequias, siendo los arrozales los sistemas más afectados.

La primera cita en Europa se produjo en 2009, precisamente en el Delta del Ebro. Desde entonces, dado que se trata de una EEI que genera un impacto económico relevante, se han llevado a cabo grandes esfuerzos para su control y erradicación. Un ejemplo de ello lo ofrecen las cifras de los trabajos de extracción tanto de ejemplares, como de puestas de caracol realizados por la CHE desde el año 2016 hasta el año 2020. Así, en 2017 se extrajeron 9.919 caracoles y 25.423 puestas en el río Ebro en Tortosa; y 221 caracoles y 215 en el río Ebro en Miravet, o en 2016, cuando se retiraron 6.922 caracoles y 7.553 puestas aguas abajo de Tortosa, y en 2015 1.695 caracoles y 1.620 puestas (CHE, 2020).

Las vías de dispersión barajadas para esta especie son: la acuariofilia (para nuevas introducciones), la dispersión asociada a movimientos de maquinaria agrícola, la pesca fluvial desde orilla y desde embarcación, y la navegación. Por ello, una de las medidas para evitar su dispersión es limitar la navegación de todas aquellas embarcaciones que naveguen en el río Ebro desde la descarga de la central eléctrica de Flix (Tarragona) hasta el puente del Estado en Tortosa (Tarragona). Todas estas embarcaciones no tienen permitido navegar en ningún otro tramo de río ni embalse de la demarcación (CHE, 2018).



Fig. 4.1 Ejemplar de caracol manzana (*Pomacea* spp.) y puesta de huevos en planta de arroz. Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE).

Las citas recogidas de *Pomacea insularum* en la base de datos EXOCAT pueden visualizarse en la figura 4.8, aunque es probable que también existan poblaciones aguas abajo de Tortosa.

- **Mejillón cebra** (*Dreissena polymorpha*)

El mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) es un molusco bivalvo de agua dulce que posee una asombrosa capacidad de dispersión y de colonización, alterando los hábitats de especies autóctonas y compitiendo con ellas por los recursos. Además se trata de una gran amenaza para el molusco bivalvo *Margaritifera auricularia*, especie autóctona y protegida por la delicada situación en la que se encuentran sus poblaciones. Sumado a estos impactos ecológicos, encontramos las repercusiones económicas que desencadena el establecimiento del mejillón cebra en cualquier tubería, obturando completamente los sistemas de captación y distribución (CHE, 2021). Se estima que el coste de la expansión de esta especie en el periodo 2016-2025, podría alcanzar los 105 millones de euros (CHE, 2020).

En aguas de la cuenca del Ebro se detectó por primera vez en julio de 2001, en el meandro de Flix y el embalse de Ribarroja. En 2004 se confirmó la presencia de adultos en el embalse de Mequinenza, posteriormente en 2006 en el embalse de Sobrón y en septiembre de 2008 en el embalse de Calanda.

Entre los vectores de dispersión de esta especie invasora se encuentra la navegación recreativa, la pesca deportiva desde embarcación, los trasvases de agua a pequeña y gran escala y cualquier actividad que implique movimiento de aguas de una masa a otra.

Dado el impacto ecológico y económico que ejerce esta EEI, en 2007 se aprobó por Conferencia Sectorial de Medio Ambiente la "Estrategia nacional para el control del mejillón cebra" (MARM, 2009).



Fig. 4.2. Ejemplar de mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) y ejemplares agregados cubriendo una roca.
Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE).

Las citas recogidas de *Dreissena polymorpha* en la base de datos EXOCAT pueden visualizarse en la figura 4.8. Estas se concentran en Amposta y en Tortosa, aunque es probable que la especie esté mucho más extendida.

- **Cangrejo rojo (*Procambarus clarkii*)**

El cangrejo rojo (*Procambarus clarkii*) es un artrópodo crustáceo, que presenta la región corporal rojiza. Habita en todo tipo de zonas acuáticas: ríos de poca corriente, pantanos, charcas, acequias, o marismas de aguas templadas, sin embargo, no ocupa las cabeceras de los ríos ni zonas frías. Se trata de una especie muy resistente, que soporta amplio rango de temperaturas, bajas concentraciones de oxígeno, aguas turbias, muy contaminadas y hasta periodos de sequía.

Ejerce una presión muy importante sobre las poblaciones del cangrejo de río común (*Austropotamobius pallipes*), tanto por la competición que mantiene por los recursos y el territorio como por el hecho de ser el vector de propagación del hongo de la afanomicosis (*Aphanomices astaci*) que es mortal para *A. pallipes*. Además, a causa de su agresividad y tamaño es capaz de alimentarse de todo tipo de anfibios. En cuanto a su impacto económico, disminuye la productividad de las cosechas de arroz y genera muchos daños en acequias y canales por los túneles que perfora (Gobierno de Aragón, 2021).



Fig. 4.3. Ejemplar de cangrejo rojo americano (*Procambarus clarkii*). Fuente: CEDEX.

Las citas recogidas de *Procambarus clarkii* en la base de datos EXOCAT pueden visualizarse en la figura 4.8. Estas se localizan tanto en el río Ebro (Tortosa y zona de desembocadura), como en acequias entre zonas de cultivo.

- **Cangrejo azul** (*Callinectes sapidus*)

El cangrejo azul (*Callinectes sapidus*) es un artrópodo crustáceo nativo de los estuarios y aguas costeras del Atlántico occidental. Habita sobre fondos de fango y arena de aguas litorales, lagunas costeras y ambientes estuarinos, desde la línea de marea hasta los 90 metros de profundidad, aunque prefiere profundidades menores a 35 metros. Se alimenta de una amplia variedad de bivalvos, crustáceos, anélidos, poliquetos, pequeños peces, material vegetal, detritus y carroña, lo que le dota de un alto potencial invasor (Soler 2017).



Fig. 4.4. Ejemplar cangrejo azul (*Callinectes sapidus*). Fuente: Soler (2017).

En las aguas del Mediterráneo español, el primer espécimen de cangrejo azul fue capturado en noviembre de 2012 en el Delta del Ebro (Castejón y Guerao, 2013), pero desde entonces la población no ha hecho más que aumentar y en 2017 ya había colonizado todo el Delta (Soler 2017). Ha sido tal su expansión y su adaptación al medio que en el verano de 2018, en los trabajos de control de las poblaciones de caracol manzana, se detectaron ejemplares de cangrejo azul, una especie originariamente marina (Pérez et al., 2019). De hecho, parece que la presencia y expansión de cangrejo azul en Tortosa ha sido beneficiosa para el control de las poblaciones de caracol manzana, al menos, en Tortosa (Pérez et al., 2019).



Fig. 4.5. Cangrejo azul atacando a un caracol manzana en el bajo Ebro. Fuente: Pérez et al., 2019.

Las citas recogidas de *Procambarus clarkii* en la base de datos EXOCAT pueden visualizarse en la figura 4.8. No obstante, como se ha comentado más arriba, desde 2018 el cangrejo azul ha logrado penetrar en el río Ebro desde la desembocadura hasta, al menos, Tortosa, y está presente en toda la zona de aguas costeras y de transición que abarca el Delta.

- **Rana toro** (*Lithobates catesbeianus*)

La rana toro (*Lithobates catesbeianus*) es una especie de anfibio nativa de la costa este América del Norte. En su área de distribución introducida tiende a ocupar cualquier tipo de hábitat que contenga aguas estancadas o de escaso movimiento, especialmente si hay abundante vegetación acuática o riparia y restos vegetales en descomposición. Además, es capaz de soportar niveles de contaminación relativamente altos, lo que le ha permitido usar hábitats degradados por la actividad humana. De hecho algunos estudios sugieren que puede que muestre preferencia por hábitats altamente artificiales y modificados, carentes de complejidad, lo que contribuye a facilitar las condiciones para la búsqueda y captura de sus presas, que comprenden un gran número de especies (MAGRAMA 2013).

En el Delta del Ebro se detectaron los primeros renacuajos en el año 2018, lo que impulsó la puesta en marcha de un plan de erradicación por parte de la Generalitat. Después de dos años, en julio de 2020, técnicos del parque natural del delta del Ebro han localizado un ejemplar muerto de rana toro en la zona del hemidelta norte y rastros de nuevos ejemplares.



Fig. 4.6. Renacuajos de rana toro encontrados en las lagunas del delta del Ebro en 2018. Fuente: www.diarimes.com

Las citas recogidas de *Lithobates catesbeianus* en la base de datos EXOCAT pueden visualizarse en la figura 4.8.

- **Gambusia** (*Gambusia holbrooki*)

La gambusia (*Gambusia holbrooki*) es un pequeño pez nativo de la costa este del continente americano. Ocupa gran variedad de ambientes, como grandes y pequeños ríos, lagos, lagunas, charcas artificiales, embalses, ramblas con escaso caudal e incluso fuentes artificiales, aunque muestra preferencia por tramos de escasa corriente, poca profundidad, abundante vegetación y sustratos de color oscuro. Se caracteriza por ser una especie muy tolerante a variaciones ambientales. (Moreno y Ruiz 2017).

Esta especie, que fue introducida en España a principios de siglo XX para combatir el paludismo, fue introduciéndose activa y progresivamente en la mayoría de cuencas hidrográficas españolas con la misma finalidad. En las lagunas litorales del Delta, la gambusia es la especie dominante, habiendo desplazado ya prácticamente a las dos especies de cipronodóntidos presentes. El samaruc (*Valencia hispanica*) ha desaparecido de casi todos sus hábitats, mientras que el fartet (*Aphanius Iberus*) se refugia en zonas de mayor salinidad en las que la gambusia no prospera bien (Moreno y Ruiz 2017).



Fig. 4.7. Ejemplar de gambusia (*Gambusia holbrooki*). Autor: C. González-Revelles en Moreno y Ruiz (2017).

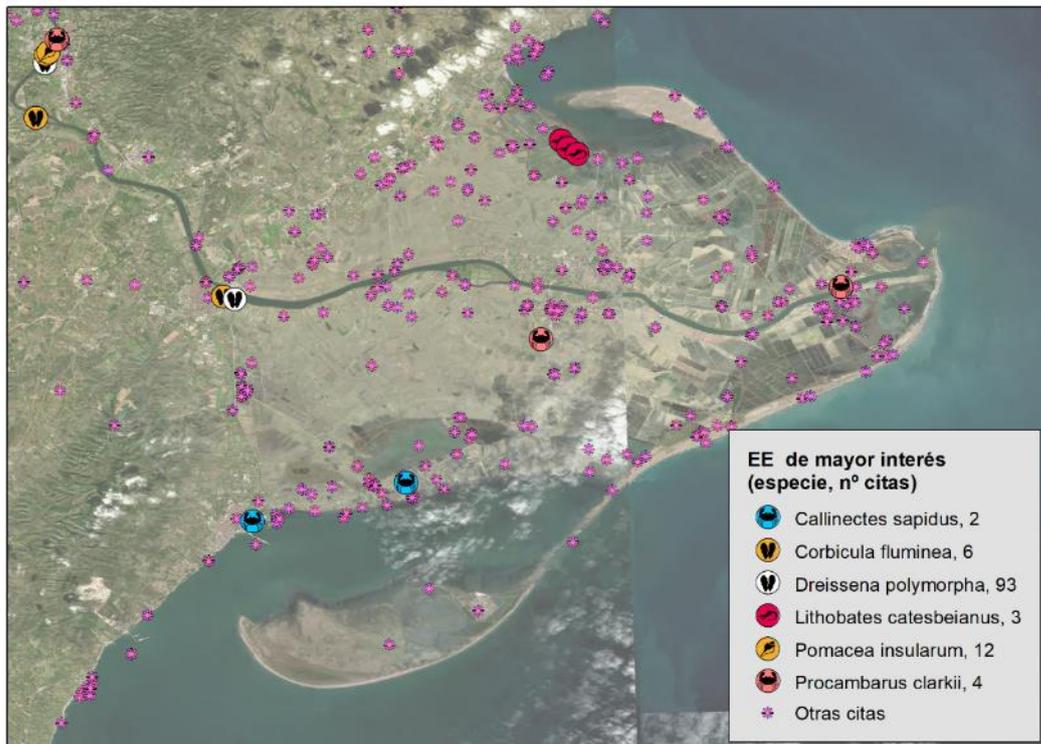
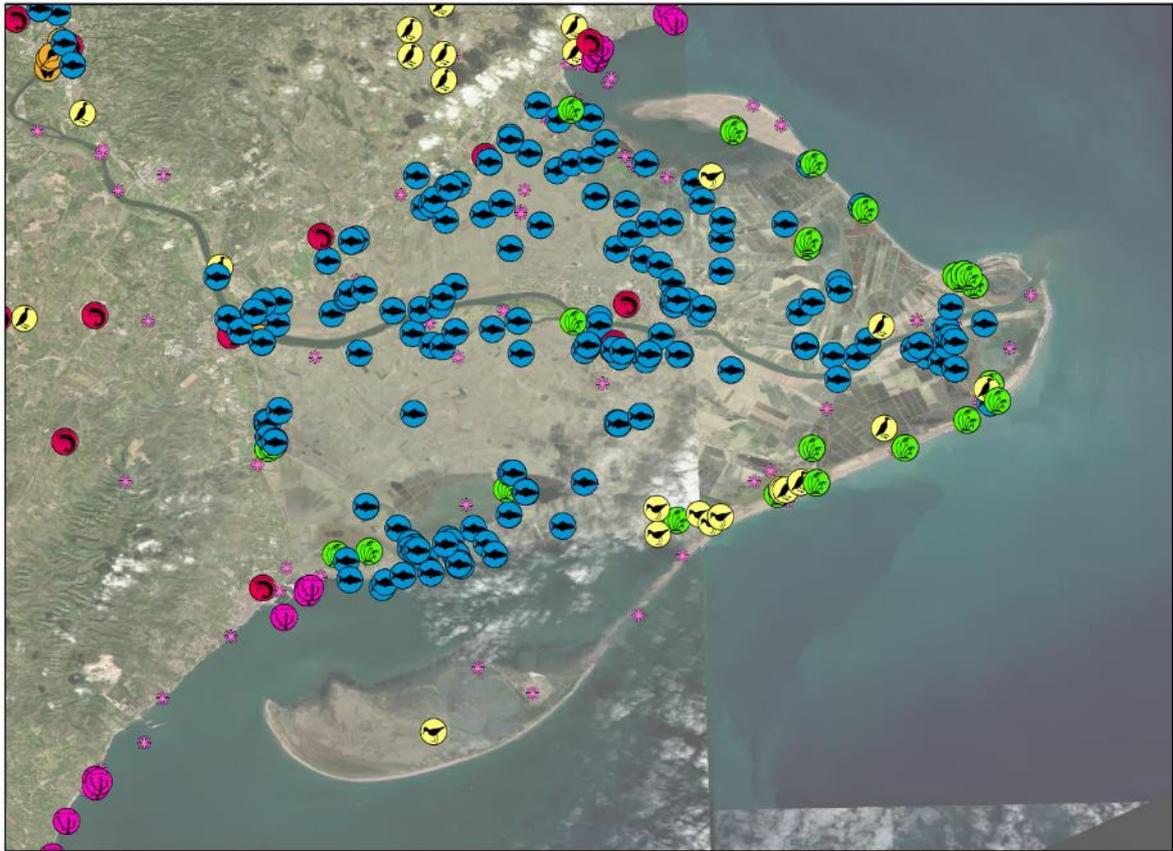


Fig. 4.8. Citas de las Especies Exóticas (EE) con potencial invasor más preocupante en el entorno del Delta del Ebro. Fuente: Elaboración propia a partir de la información contenida en el Sistema de Información de las Especies Exóticas de Cataluña (EXOCAT). Consultada 2021.

Además de las especies descritas, el Sistema de Información de las Especies Exóticas de Cataluña (EXOCAT) muestra numerosas citas en el entorno del Delta del Ebro (fig. 4.9). Destacan por su abundancia las citas de EEI piscícolas como el dojo (*Misgurnus anguillicaudatus*), la carpa (*Cyprinus carpio*), el alburno (*Alburnus alburnus*) o el carpín dorado (*Carassius auratus*).



**EE más citadas (>10 citas)
(nº citas, especie)**

148, <i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	26, <i>Sander lucioperca</i>	19, <i>Myiopsitta monachus</i>
44, <i>Cyprinus carpio</i>	28, <i>Scardinius erythrophthalmus</i>	12, <i>Phoenicopterus ruber</i>
43, <i>Alburnus alburnus</i>	22, <i>Fundulus heteroclitus</i>	28, <i>Oculina patagonica</i>
40, <i>Carassius auratus</i>	11, <i>Ictalurus punctatus</i>	17, <i>Aster squamatus</i>
40, <i>Pseudorasbora parva</i>	13, <i>Rhynchophorus ferrugineus</i>	11, <i>Arundo donax</i>
35, <i>Rutilus rutilus</i>	93, <i>Dreissena polymorpha</i>	11, <i>Xanthium echinatum subsp. italicum</i>
30, <i>Silurus glanis</i>	12, <i>Pomacea insularum</i>	10, <i>Paspalum vaginatum</i>
30, <i>Gambusia holbrooki</i>	30, <i>Phasianus colchicus</i>	Especies con menos de 10 citas

Fig. 4.9. Citas de las Especies Exóticas (EE) en el entorno del Delta del Ebro. Fuente: Elaboración propia a partir de la información contenida en el Sistema de Información de las Especies Exóticas de Cataluña (EXOCAT). Consultada 2021.



**ANEJO 2. RESUMEN DIVULGATIVO DEL “PLAN DE
ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL
RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA
DEL EBRO”**



**ANEJO 3. PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE
LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL
ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO**



**ANEJO 4: NOTA TÉCNICA “CARACTERIZACIÓN DEL
RÉGIMEN SEDIMENTARIO FLUVIAL EN EL ÁMBITO
DEL DELTA DE EBRO”**



ANEJO 5: PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL BORDE LITORAL DEL DELTA DEL EBRO



**ANEJO 2. RESUMEN DIVULGATIVO DEL “PLAN DE
ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL
RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL
EBRO”**



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

**RESUMEN DIVULGATIVO DEL
PLAN DE ACTUACIÓN
PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL
RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO
DEL DELTA DEL EBRO**

ESTADO DE IMPLANTACIÓN

2 de febrero de 2021



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. CARACTERIZACIÓN ACTUAL DE LOS SEDIMENTOS EN RIBARROJA Y MEQUINENZA.....	7
3. LA DIFICULTAD DE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS EN RIBARROJA Y MEQUINENZA.....	8
4. EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR EL RÍO EBRO HASTA EL DELTA DEL EBRO Y EL PAPEL DE LA CUENCA AGUAS ABAJO DE FLIX.....	9
5. PLAN DE ACTUACION PREVISTO Y ESTADO DE IMPLANTACIÓN.....	9
6. CONCLUSIONES.....	13



1. INTRODUCCIÓN.

La regulación del régimen hidrológico a través de los distintos embalses en España y en la cuenca del Ebro en especial, ha producido y sigue produciendo un importante desarrollo económico en toda la cuenca y un incremento de la seguridad frente a inundaciones y sequías, de forma que toda la cuenca del Ebro sería muy distinta si no existiese esta regulación.

Si esta alteración ha sido importante en el régimen de caudales, más aún ha sido en el ámbito del transporte de sedimentos. Los efectos de las alteraciones del régimen sedimentario son más lentos y mucho más complejos de resolver que los causados en el régimen hidrológico, lo que hace que hasta el momento no hayan sido tratados con la profundidad que es necesario considerar.

Es por ello que se ha redactado el “Plan de Actuación para la mejora de la gestión del régimen sedimentario en el ámbito del Delta del Ebro”, en cuya elaboración ha participado el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, la Confederación Hidrográfica del Ebro y la Dirección General del Agua y que resume el estado del conocimiento en materia de dinámica sedimentaria del río Ebro, así como las líneas de actuación futuras para la mejora de su gestión, que pretende ser un punto de partida para lograr un acción coordinada entre todas las administraciones y los agentes implicados para lograr una mejora del tránsito sedimentario del río Ebro y la mejora con ello de los aportes de sedimentos al Delta del Ebro.

Este Plan de actuación tiene como objetivo central el impulso a aquellos aspectos de la gestión del régimen hidrológico y sedimentario que pueden colaborar con la protección y mejora de la gestión del Delta del Ebro que son responsabilidad de la Dirección General del Agua y de la Confederación Hidrográfica del Ebro, en coordinación con la Dirección General de la Costa y el Mar, en el marco del “Plan para la protección del Delta del Ebro”.

Ambas Direcciones Generales están trabajando de forma conjunta, para desarrollar a corto, medio y largo plazo distintas acciones que, fomentando el conocimiento y la transparencia, permitan paliar o gestionar los problemas derivados de la gestión del Delta en la actualidad y ante los previsibles efectos del cambio climático. En el desarrollo de estas acciones se tendrán especialmente en cuenta los trabajos realizados con anterioridad por todas las administraciones, y en especial, con la experiencia y coordinación de la Generalitat de Cataluña y en especial, de la Agencia Catalana del Agua.

La gestión del Delta del Ebro es compleja y necesita de un sólido equilibrio, basado en los distintos planes de actuación, tanto derivados de la gestión del litoral, como de la gestión de sus espacios naturales y de los usos del Delta -en especial de la pesca y el regadío- y de la gestión hidrológica del río Ebro y afluentes, más afectados aún con el cambio climático.

En este documento se proponen una serie de medidas a partir de lo indicado en el Esquema de Temas Importantes informado por el Consejo del Agua de la cuenca del



Ebro el 30 de diciembre de 2020, como primer hito del tercer ciclo del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro, cuyo objetivo esencial es mejorar la resiliencia del delta del Ebro y su costa, de especial actualidad tras su inundación por la tormenta Gloria, a finales de enero de 2020.

Según diversos estudios consultados, por ejemplo, los recientemente realizados por la Oficina Catalana del Canvi Climàtic y por la propia Agencia Catalana del Agua (en particular, por ejemplo, puede destacarse la reciente exposición virtual "El Delta del Ebro y el cambio climático" organizada por dichas instituciones con la colaboración del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña), el cambio climático provocará la previsible elevación del nivel del mar, un incremento de los temporales, y una mayor temperatura y acidificación. En los últimos años se ha registrado un aumento del nivel del mar de entre 2 y 3 mm/año durante el último siglo, con importantes variaciones en la cuenca mediterránea, por efectos regionales. Respecto al oleaje, en las últimas 6 décadas se han observado importantes cambios tanto en su intensidad como en su dirección. Las zonas más vulnerables son la parte exterior costera, el cauce inferior o zona estuárica, las lagunas y las bahías.

De forma esquemática podemos indicar que, en relación con el transporte de sedimentos, el Delta del Ebro está sometido a dos presiones complejas que deben ser tratadas de forma diferenciada y coordinada:

- La erosión por el mar, favorecida por los efectos del cambio climático, para lo cual es necesario un aporte de material grueso por parte del río que permita incrementar la disponibilidad de sedimentos gruesos en el litoral.
- La subsidencia, para lo cual es necesario mejorar su cuantificación y un aporte de material (finos y gruesos) en las zonas emergidas del Delta que compense la subsidencia.

Los sedimentos que transporta el río Ebro pueden a su vez dividirse en dos grandes grupos:

- Los sedimentos gruesos se transportan por arrastre de fondo en situaciones de crecida.
- Los sedimentos finos se transportan diluidos en el agua tanto en caudales ordinarios como en avenidas.

Por lo tanto, en materia de afección al Delta del Ebro, se da la siguiente problemática:

- Los sedimentos gruesos, que son los únicos válidos para frenar la erosión por el mar, se quedan retenidos en los embalses y el aporte al Delta del Ebro de sedimentos útiles es únicamente el producido por la cuenca aguas abajo de los grandes embalses de la cuenca del Ebro. Además, aguas abajo de los embalses se produce una erosión importante, produciendo la incisión en el lecho del río, e incluso, pérdida de conexión con las llanuras de inundación, desestabilización de las orillas, modificaciones en las formas del lecho del río, etc.



- En ausencia de grandes avenidas, los sedimentos finos llegan al mar sin inundar la parte emergida del Delta, por lo que no contribuyen a frenar la subsidencia.

n este Plan de actuación que se presenta en este documento y que formará parte del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro del tercer ciclo, establece una serie de conclusiones y líneas de actuación que establecen una hoja de ruta para mejorar el tránsito sedimentario en la cuenca del Ebro en los próximos años.

2. CARACTERIZACIÓN ACTUAL DE LOS SEDIMENTOS EN RIBARROJA Y MEQUINENZA.

Desde la construcción y puesta en marcha de los sistemas de embalse de Mequinenza, Ribarroja y Flix durante la década de 1960, la circulación del régimen de caudales y sedimentos a lo largo del eje del río Ebro se ha modificado notablemente.

En el Plan de actuación se han resumido y analizado todos los estudios existentes hasta la fecha, llegando a las siguientes conclusiones:

Respecto al embalse de Mequinenza, las grandes dimensiones del embalse de Mequinenza, 108 km de longitud y 1483.29 hm³ de capacidad, lo convierten en una barrera que retiene la práctica totalidad del sedimento que llega al embalse por arrastre de fondo y en suspensión. Además, se deposita una parte de los sólidos disueltos.

En cuanto al volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mequinenza en la actualidad se estima que estará en torno a los 240 hm³, aunque hay todavía incertidumbre en esta cifra que hay que mejorar con nuevos estudios que ya están en marcha. Las tasas de aportación de sedimentos al embalse de Mequinenza se estiman en este informe en 6,68 Mt/año en el periodo de 1966 a 1982 y en 4,37 Mt/año entre 1982 y 2012. La actual tasa de sedimentación del embalse de Mequinenza se estima en 4,36 Mt/año, equivalente a 3,87 hm³/año.

Por otro lado, los sondeos realizados en el embalse en 2012 han permitido caracterizar el sedimento en este tramo de embalse. Se calcula que, de los 40,2 hm³ de sedimento que existen en este tramo, 10,7 hm³ son de arena y 3,7 hm³ son de grava.

Respecto al embalse de Ribarroja, los estudios realizados en el presente informe permiten estimar que en la actualidad (2020) la sedimentación de Ribarroja se encuentra entre 15 y 19,3 hm³. Partiendo del valor medio del rango de sedimentación, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0,55 Mt/año, valor que desciende prácticamente a la mitad, 0,26 Mt/año, en el período 2004-2016.

No se dispone de información sedimentológica que permita caracterizar el sedimento del embalse, por lo que al igual que en Mequinenza, se encuentra en licitación los trabajos para la caracterización adecuada de los sedimentos existentes.



En cuanto al tránsito de sedimentos hacia el curso bajo del Ebro, se estima que en la actualidad la tasa de transporte de sedimentos en suspensión aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Ribarroja y Flix es de 0,37 Mt/año. Al igual que en el caso anterior, a estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.

En la actualidad todo el material de arrastre de fondo de la cuenca del Ebro aguas arriba de Mequinenza, y de las cuencas de los ríos Cinca y Segre, queda retenido en la cola de los embalses. El único sedimento que sale de Mequinenza es el disuelto, que no tiene ninguna influencia en la dinámica sedimentológica del curso bajo. El único sedimento en suspensión que circula por el Ebro a la altura de Flix, es el no retenido en Ribarroja que se estima en un 60% de las aportaciones conjuntas de las cuencas del Cinca y del Segre.

3. LA DIFICULTAD DE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS EN RIBARROJA Y MEQUINENZA

Existen ya varias experiencias de movilización de sedimentos en grandes embalses de la cuenca del Ebro, todas ellas han sido operaciones muy complejas y con importantes afecciones ambientales, por lo que cualquier estudio debe considerar la complejidad y efectos ambientales de las posibles actuaciones. En este sentido, los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix llevan almacenando sedimentos desde hace ya más de 60 años, por lo que cualquier actuación debe ser analizada con mucha cautela.

La CHE ha evaluado en el estudio *“Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix”*, la posibilidad de restaurar el tránsito sedimentarios en la zona, llegando a la conclusión de que *“Las únicas alternativas viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix son la retirada mecánica mediante excavación en seco (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix). La viabilidad de la retirada mecánica debe analizarse mediante un estudio económico específico, pero los valores más favorables recopilados en la literatura suponen unos costes muy elevados. Con relación a las medidas de evacuación hidrodinámica, requieren condiciones muy singulares, que no se dan en los embalses del sistema, por lo que las efectividades esperables son muy bajas”*.

La remoción de sedimentos del embalse de Ribarroja mediante una bajada brusca del nivel del embalse (técnica hidrodinámica de lavado) es la actuación más factible, si bien con una efectividad de carácter limitado. Sin embargo, el vaciado del embalse de Ribarroja y el flujo de sedimentos que se generaría aguas abajo puede generar impactos socioeconómicos y medioambientales de gran magnitud, por ejemplo, la posible necesidad de parar las centrales nucleares de Ascó y Vandellós, al dejar de estar operativa la central hidroeléctrica de Ribarroja, que les da respaldo de seguridad. También se afectaría a los usos recreativos del embalse de Ribarroja basados en la pesca de especies alóctonas y en especial del siluro, se verían dramáticamente



dañados y tendrían que esperar varios años para recuperarse, junto con todo el cauce aguas abajo del Ebro.

Por lo tanto, cualquier actuación en este sentido debe estar avalada por estudios científicos, modelación matemática, ensayos y pruebas piloto, de forma que haya un adecuado consenso entre la sociedad sobre las soluciones a implantar.

4. EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR EL RÍO EBRO HASTA EL DELTA DEL EBRO Y EL PAPEL DE LA CUENCA AGUAS ABAJO DE FLIX.

La movilización de los sedimentos en el río Ebro desde el embalse de Flix hasta su llegada al Delta del Ebro debe ser estudiada igualmente con profundidad. Tal y como se ha comentado con anterioridad, es necesario conocer detalladamente el estado del lecho del río tras 60 años sin recibir aportes de sedimentos gruesos, de forma que puedan realizarse modelos numéricos y ensayos que permitan conocer la capacidad de transporte del río y los tiempos de tránsito del sedimento hasta su llegada al Delta.

Es necesario igualmente estudiar la cuenca aguas abajo de Flix, no solo como una posible fuente de sedimentos, sino también como ensayo piloto de metodologías que puedan aplicarse posteriormente al río Ebro.

Igualmente, es importante el estudio de los azudes y otros obstáculos existentes en el río Ebro y afluentes, para, en su caso, mejorar la continuidad fluvial y favorecer el transporte de sedimentos asociado, de forma que se facilite el tránsito sedimentario y se optimicen los tiempos de llegada de los sedimentos al Delta.

En este sentido, existen ya experiencias positivas, en especial las incluidas en el proyecto Life Ebro ADMICLIM, en el que se han realizado varias pruebas piloto de inyección de sedimento en el tramo final del río Ebro y en la red de canales de riego del Delta, cuyos resultados y experiencias deben ser la base de las acciones futuras.

Por otro lado, las crecidas controladas del río Ebro deben desarrollar un relevante papel en este proceso, como fuente esencial de energía para la movilización del sedimento futuro, pero por el contrario, deben ser compatibles con los usos del suelo y con el equilibrio del lecho del río.

5. PLAN DE ACTUACION PREVISTO Y ESTADO DE IMPLANTACIÓN

A partir de la información anteriormente citada, se presentan las siguientes actuaciones a ejecutar en los próximos meses:

1. Caracterización cartográfica y sedimentaria de la cuenca aguas abajo de Flix.

Se encuentra ya contratada la realización de los estudios de detalle de la caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Ciurana,



Guiamets y Margalef y de sus cauces asociados, como posibles casos piloto para el estudio de la circulación de sedimentos hasta el Delta del Ebro por un importe de 102.206,33 euros para la caracterización topográfica y 48.032,19 euros para la caracterización de los sedimentos (IVA no incluido). Los trabajos se iniciarán en durante febrero/marzo de 2021.

2. **Cartografía de detalle del eje el Ebro desde Flix hasta el Delta del Ebro.**

Igualmente se encuentra ya contratado la realización de la cartografía de detalle del eje del Ebro y la caracterización del estado del lecho del río desde Flix hasta el Delta del Ebro con un presupuesto de 364.536,36 euros (IVA no incluido), incluyendo la granulometría y estado del sustrato del río, de forma que se permita tener las herramientas necesarias para desarrollar una adecuada modelización matemática del transporte de sedimentos a lo largo del eje del Ebro y sus afluentes. Los trabajos se iniciarán en durante febrero/marzo de 2021.

3. **Cartografía del embalse de Mequinenza y caracterización de sedimentos existentes en Mequinenza y Ribarroja.**

Igualmente, en estos momentos está en licitación la realización de una batimetría actualizada de Mequinenza (en Ribarroja recientemente se ha realizado una nueva batimetría por el titular del embalse) y la caracterización del estado de los sedimentos, volumen y granulometría de los embalses de Mequinenza y Ribarroja. El presupuesto es de 749.112,97 (IVA no incluido) y se espera que los trabajos puedan empezar antes del verano de 2021, con un plazo de ejecución de 6 meses.

4. **Modelación hidrodinámica del tránsito de sedimentos desde los 5 embalses estudiados hasta el Delta del Ebro.**

Con toda esta información, el CEDEX procederá, con el asesoramiento de distintas universidades y expertos, a realizar los estudios hidrodinámicos necesarios para valorar la posibilidad de estudiar con detalle alternativas que permitan mejorar el tránsito sedimentario en el tramo bajo del río Ebro, tanto de la cuenca propia como de los embalses aguas arriba, en función de la mejora del conocimiento científico-técnico, y teniendo en cuenta las potenciales afecciones que puedan producir contaminación de los sedimentos en esta zona, considerando además la posibilidad de mejorar el régimen de las crecidas controladas en el río Ebro aguas abajo del embalse de Flix, para controlar la población de macrófitos y mejorar el transporte sólido, así como continuar trabajando para asegurar el adecuado estado de mantenimiento de los desagües de fondo de las presas de la cuenca del Ebro.

En estos estudios se tendrán en cuenta de manera especial aquellos trabajos similares que haya realizado con anterioridad la Agencia Catalana del Agua u otros organismos de la Generalitat de Catalunya, garantizando la coordinación



necesaria con todas las Comunidades Autónomas para evitar duplicidades y avanzar sobre el conocimiento y la experiencia existente.

5. Estudio de las barreras transversales existentes en los cauces aguas abajo de Flix y propuesta de proyectos de permeabilización.

Con toda la información cartográfica disponible y con los resultados de la modelación numérica a desarrollar, se realizarán los proyectos constructivos y obras necesarias que permitan una adecuada mejora del tránsito sedimentario, de forma que se minimicen los efectos de las obras transversales existentes.

6. Diseño de un protocolo de gestión de los sedimentos.

A partir de los resultados anteriormente citados, y con todas las experiencias existentes, se procederá a redactar un protocolo de actuación que establezca un marco técnico científico de actuación que permita la mejora del régimen sedimentario del Delta del Ebro. Este protocolo deberá basarse en pruebas y ensayos piloto que permitan buscar metodologías eficaces y que minimicen los efectos económicos y ambientales de estas actuaciones.

A partir de todas estas experiencias, se procederá a realizar un protocolo de gestión de los sedimentos en los embalses que mejor contribuyan al incremento del transporte de sedimentos en el río Ebro y afluentes. Este protocolo deberá contener, al menos, por ejemplo:

- Una zonificación del embalse en función de los mecanismos de movilización de los sedimentos existentes en él, zonificando la superficie del embalse por las técnicas previsibles de movilización de los mismos, bien a partir de excavaciones en seco allí donde sea posible dentro del embalse, o extracción por bombeos o por aperturas de los órganos de desagüe de los mismos a partir de la adecuada caracterización físico-química y de contaminantes de los sedimentos.
- Los protocolos de entrega de los sedimentos extraídos del embalse al cauce aguas abajo, en función de la técnica de movilización del sedimento, ubicación de los puntos de entrega, época del año, caudal circulante en el río, condiciones de calidad de las aguas exigidas aguas abajo, etc.
- Régimen de caudales de descarga del embalse necesario para permitir la movilización de los sedimentos en los cauces aguas abajo.
- Mecanismos de monitorización y seguimiento efectivo del transporte de sedimentos aguas abajo a través de marcaje y trazadores en los mismos y publicación de los mismos en internet. En especial debería cuantificarse el volumen real de sedimento movilizado para evaluar la



efectividad de los mecanismos de movilización y la persistencia en el tiempo de esta efectividad.

- Seguimiento de los efectos en la calidad de las aguas (indicadores físico químicos, biológicos y químicos) en el embalse y en el tramo de aguas abajo afectado por la movilización.
- Mecanismos legales y de gobernanza que permitan la puesta en marcha de las distintas actuaciones en coordinación con el titular, usuarios de los embalses y los distintos departamentos de las Comunidades Autónomas afectadas. Además, deberá establecerse de forma expresa, en relación con el titular de la presa, la relación de las actuaciones con las normas de explotación, los protocolos que han de ir asociados a las maniobras a ejecutar con especial indicación de la duración, caudales de descarga, hidroavisos a considerar y todos aquellos temas de seguridad y previsión de eventualidades que puedan surgir.
- Procedimientos de participación y comunicación ciudadana necesarios para aplicar antes, durante y después de la movilización de sedimentos. En especial hay que establecer procedimientos de aviso a todos los usuarios relacionados con el tramo afectado para que tomen las medidas oportunas (abastecimientos, energéticos y regadíos). Constitución, en su caso, o mantenimiento de comités de seguimiento de las operaciones para implicar a la comunidad científica y a la ciudadanía.
- Evaluación y corrección de las posibles afecciones de tipo social, económico o ambiental que pueda generar la movilización de sedimentos. En especial se debe garantizar la calidad del agua de boca en todos los abastecimientos relacionados con el tramo susceptible de ser afectado. Entre las afecciones se destaca la afección al CAT, a la Central Nuclear de Ascó, a los riegos, mariscadores y pescadores. Desde el punto de vista ambiental se destaca la posible afección a la fauna silvestre.
- Procedimientos asociados para disponer de todas las autorizaciones necesarias y protocolos de aviso para la realización de las operaciones y constitución de grupos de coordinación administrativa para hacer un seguimiento de las actuaciones realizadas y buscar la corresponsabilidad de todas las administraciones.
- Hacer un informe de lecciones aprendidas de cada operación de movilización y presentar sus conclusiones de forma pública junto con una propuesta de mejora, de forma que se realice una evaluación de los beneficios de la movilización en el aumento de la resiliencia del Delta del



Ebro y propuestas de mejora y un análisis global de costes y de beneficios.

7. Creación del Observatorio Hidrológico del Delta del Ebro

Es imprescindible recuperar y mantener un sistema de seguimiento y monitorización de todos los datos hidrológicos del Delta del Ebro, a través de la potenciación de la RIADE y realización de estudios para medir la subsidencia con datos empíricos o a partir de las imágenes de satélite y con ello, dotarnos de herramientas técnico científicas coordinadas entre la Dirección General del Agua, Dirección General de la Costa y el Mar, Puertos del Estado, Confederación Hidrográfica del Ebro, la Generalitat de Cataluña, en especial a través de Agencia Catalana del Agua, que permitan monitorizar la evolución del Delta y el impacto tanto del cambio climático como de las medidas que se van implantando.

En este sentido, la Dirección General del Agua y la Confederación Hidrográfica del Ebro están ya tramitando los siguientes nuevos contratos:

- Nivelación de alta precisión en el Delta del Ebro (87.143,70 euros, IVA no incluido), ya en fase de adjudicación final, cuyos trabajos esperan iniciarse en primavera de 2021 y servirá para caracterizar adecuadamente el fenómeno de la subsidencia.
- Mejora de la información hidrológica disponible en la Red de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro (RIADE), con un presupuesto estimado de 1.000.000 euros en preparación, que se espera licitar antes del verano de 2021.

6. CONCLUSIONES

Este plan de actuación para la mejora del régimen sedimentario del Delta del Ebro establece una hoja de ruta que permita, con el mayor soporte científico y social, mejorar el tránsito sedimentario y los aportes de sedimentos al Delta del Ebro.

Estas actuaciones tienen una elevada complejidad técnica y múltiples afecciones sociales y socioeconómicas, por lo que necesitan un importante soporte científico y son complejas de resolver, por lo que se necesita tiempo y rigor para lograr una adecuado consenso en la búsqueda de soluciones. La alteración del transporte de sedimentos en los últimos 60 años ha tenido importantes impactos en la zona, pero revertir la situación llevará igualmente un tiempo importante. La movilización de sedimentos de los grandes embalses de la cuenca será compleja y el tiempo de tránsito hasta su llegada al Delta será también lento.



RESUMEN DIVULGATIVO DEL PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, trabajando coordinadamente ha elaborado esta hoja de ruta a la vez que ha procedido a la tramitación administrativa de los contratos que permitirán establecer la implantación efectiva de las primeras fases del mismo, de este modo, durante el año 2020 se han preparado diversos contratos con una inversión total superior al 1.350.000 euros (IVA no incluido) que se corresponden a más de 1,6 millones de euros con IVA que permitirán durante 2021, disponer de las herramientas que permitan consensuar entre todos los agentes implicados las actuaciones conjuntas a desarrollar en el futuro que permitan mejorar este tránsito sedimentario.



**ANEJO 3. PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA
GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL
DELTA DEL EBRO**



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

**PLAN DE ACTUACIÓN
PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL
RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO
DEL DELTA DEL EBRO**

2 de febrero de 2021



ÍNDICE

1. RESUMEN EJECUTIVO	5
2. INTRODUCCIÓN.....	12
3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL TRANSPORTE DEL SEDIMENTO EN EL TRAMO BAJO DEL RÍO EBRO. REVISIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN TÉCNICA.....	15
3.1. INTRODUCCIÓN.....	15
3.2. RECONOCIMIENTO BATIMÉTRICO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA (ZARAGOZA). SEPTIEMBRE- OCTUBRE DE 1970 (CEDEX, 1971)	16
3.3. RECONOCIMIENTO BATIMÉTRICO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA (CEDEX, 1982)	17
3.4. EL MEDIO AMBIENTE HÍDRICO EN EL DELTA DEL EBRO (CEDEX, 2002; INÉDITO)	19
3.5. ESTUDIO DE LA DINÁMICA SEDIMENTARIA Y BATIMETRÍA DE PRECISIÓN DEL EMBALSE DE RIBARROJA (GRUPO FLUMEN, 2009)	19
3.6. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LOS LODOS ACUMULADOS EN LA COLA DEL EMBALSE DE MEQUINENZA (CONTROL DE OBRA CIVIL, 2011)	21
3.7. NIVELACIÓN DE PRECISIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN EL EMBALSE DE MEQUINENZA (CONTROL DE OBRA CIVIL, 2012).....	22
3.8. EVALUACIÓN PRELIMINAR SOBRE LAS POSIBILIDADES DE RESTAURACIÓN DEL TRÁNSITO SEDIMENTARIO EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA-RIBARROJA-FLIX (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2018)	23
3.9. RESUMEN Y CONCLUSIONES	24
4. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA.....	26
4.1. INTRODUCCIÓN.....	26
4.2. REEVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD INICIAL DEL EMBALSE DE MEQUINENZA.....	26
4.3. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO HASTA 1982	27
4.4. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO HASTA 2012	30
4.5. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO EN 2020 POR AJUSTE DE LA TASA DE SEDIMENTACIÓN	33
4.6. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO EN 2020 POR AJUSTES HIDROLÓGICOS	34
4.7. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DE LA COLA DEL EMBALSE DE MEQUINENZA	38
4.8. RESUMEN	40
5. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE RIBARROJA.....	42
6. INFLUENCIA DE LOS EMBALSES DE MEQUINENZA Y RIBARROJA EN LA DINÁMICA SEDIMENTARIA DEL CURSO BAJO DEL RÍO EBRO.....	46
6.1. TASAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN EL CURSO BAJO DEL EBRO SIN EMBALSES.....	46
6.2. TASAS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN EL CURSO BAJO DEL EBRO CON EMBALSES	48
7. CONCLUSIONES SOBRE LA CARACTERIZACIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.	51
8. ANÁLISIS DE LA COMPLEJIDAD ASOCIADA A LA POSIBLE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS DEL COMPLEJO DE EMBALSES MEQUINENZA-RIBARROJA- FLIX.	54
8.1. CONDICIONANTES A LA MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS DEL COMPLEJO DE EMBALSES MEQUINENZA- RIBARROJA – FLIX.....	54
8.2. COMPLEJIDAD DEL VACIADO DEL EMBALSE DE RIBARROJA.	56
8.3. CONCLUSIONES SOBRE LA COMPLEJIDAD DEL MOVILIZADO DE LOS SEDIMENTOS EN AMBOS EMBALSES.	64
9. RÉGIMEN DE LAS CRECIDAS CONTROLADAS EN EL RÍO EBRO Y GESTIÓN DE LOS DESAGÜES DE FONDO DE LOS EMBALSES	65



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN
SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

10. ESTUDIOS DE I+D+i A REALIZAR PARA LA MEJORA DE LA DINÁMICA SEDIMENTARIA DERIVADA DEL RIO EBRO.....	66
10.1. ESTUDIO DE LA POSIBILIDAD DE LA GENERACIÓN DE SEDIMENTOS Y SU TRANSPORTE EN LA RED FLUVIAL AGUAS ABAJO DE FLIX Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS EN LAS PRESAS DE CIURANA, MARGALEF Y GUIAMETS.	68
10.2. ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN SOBRE BATIMETRÍAS Y SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA Y FLIX.....	70
10.3. PROPUESTAS DE ESTUDIOS I+D+i PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DE LOS SEDIMENTOS Y BASES PARA LA ELABORACIÓN DE PROTOCOLOS DE GESTIÓN DE SEDIMENTOS.	72
11. SEGUIMIENTO Y MONITORIZACIÓN DEL DELTA DEL EBRO: IMPULSO A LA RED RIADE Y CREACIÓN DEL OBSERVATORIO HIDROLÓGICO DEL DELTA DEL EBRO.	75
12. REFERENCIAS	84



1. RESUMEN EJECUTIVO

Este documento, en cuya elaboración ha participado el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, la Confederación Hidrográfica del Ebro y la Dirección General del Agua resume el estado del conocimiento en materia de dinámica sedimentaria del río Ebro, así como las líneas de actuación futuras para la mejora de su gestión, que pretende ser un punto de partida para lograr una acción coordinada entre todas las administraciones y los agentes implicados para lograr una mejora del tránsito sedimentario del río Ebro y la mejora con ello de los aportes de sedimentos al Delta del Ebro.

Este Plan de actuación tiene como objetivo central el impulso a aquellos aspectos de la gestión del régimen hidrológico y sedimentario que pueden colaborar con la protección y mejora de la gestión del Delta del Ebro que son responsabilidad de la Dirección General del Agua y de la Confederación Hidrográfica del Ebro, en coordinación con la Dirección General de la Costa y el Mar, en el marco del “Plan para la protección del Delta del Ebro”. Este Plan está siendo redactado con el apoyo del CEDEX, e incluye un análisis morfológico y medioambiental del Delta, un estudio del clima marítimo en torno al Delta, una caracterización de la dinámica litoral y fluvial, así como de los previsibles efectos del cambio climático y de la evolución de la costa (históricamente y recientemente) y de los probables problemas en las playas y su evolución futura.

Ambas Direcciones Generales están trabajando de forma conjunta, para desarrollar a corto, medio y largo plazo distintas acciones que, fomentando el conocimiento y la transparencia, permitan paliar o gestionar los problemas derivados de la gestión del Delta en la actualidad y ante los previsibles efectos del cambio climático. En el desarrollo de estas acciones se tendrán especialmente en cuenta los trabajos realizados con anterioridad por todas las administraciones, y en especial, con la experiencia y coordinación de la Generalitat de Cataluña y en especial, de la Agencia Catalana del Agua.

La gestión del Delta del Ebro es compleja y necesita de un sólido equilibrio, basado en los distintos planes de actuación, tanto derivados de la gestión del litoral, como de la gestión de sus espacios naturales y de los usos del Delta -en especial de la pesca y el regadío- y de la gestión hidrológica del río Ebro y afluentes, más afectados aún con el cambio climático.

En este documento se proponen una serie de medidas a partir de lo indicado en el Esquema de Temas Importantes informado por el Consejo del Agua de la cuenca del Ebro el 30 de diciembre de 2020, como primer hito del tercer ciclo del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro, cuyo objetivo esencial es mejorar la resiliencia del delta del Ebro y su costa, de especial actualidad tras su inundación por la tormenta Gloria, a finales de enero de 2020.

Según diversos estudios consultados, por ejemplo, los recientemente realizados por la Oficina Catalana del Canvi Climàtic y por la propia Agencia Catalana del Agua (en



particular, por ejemplo, puede destacarse la reciente exposición virtual “El Delta del Ebro y el cambio climático” organizada por dichas instituciones con la colaboración del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña), el cambio climático provocará la previsible elevación del nivel del mar, un incremento de los temporales, y una mayor temperatura y acidificación. En los últimos años se ha registrado un aumento del nivel del mar de entre 2 y 3 mm/año durante el último siglo, con importantes variaciones en la cuenca mediterránea, por efectos regionales. Respecto al oleaje, en las últimas 6 décadas se han observado importantes cambios tanto en su intensidad como en su dirección. Las zonas más vulnerables son la parte exterior costera, el cauce inferior o zona estuárica, las lagunas y las bahías.

En este Plan de actuación que se presenta en este documento y que formará parte del Plan Hidrológico de la cuenca del Ebro del tercer ciclo, establece las siguientes conclusiones:

CARACTERIZACIÓN ACTUAL DE LOS SEDIMENTOS EN RIBARROJA Y MEQUINENZA:

Respecto al embalse de Mequinenza:

1. La capacidad inicial del embalse de Mequinenza, hasta la cota 121.15 msnm, se ha reevaluado en 1483.29 hm³ (frente a los 1530 hm³ teóricos). Las grandes dimensiones del embalse de Mequinenza, 108 km de longitud y 1483.29 hm³ de capacidad, lo convierten en una barrera que retiene la práctica totalidad del sedimento que llega al embalse por arrastre de fondo y en suspensión. Además, se deposita una parte de los sólidos disueltos.
2. En cuanto al volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mequinenza, en el año 1982 los estudios batimétricos del CEDEX lo estimaban en 95 hm³, la CHE en 2012 lo calculaba entre 75 y 100 hm³ y para la elaboración del presente plan de actuación, el CEDEX estima que en 2012 ascendería a 211 hm³, y que en la actualidad (2020) estará en torno a los 240 hm³.

Las diferencias entre todos estos valores recomiendan ser prudentes en su interpretación y realizar los estudios complementarios indicados a continuación, para precisar con mayor rigor los valores reales.

3. Las tasas de aportación de sedimentos al embalse de Mequinenza se estiman en este informe en 6,68 Mt/año en el periodo de 1966 a 1982 y en 4,37 Mt/año entre 1982 y 2012.
4. En el lapso de tiempo de 30 años, desde 1982 a 2012, se acumularon en los últimos 42 km de la cola del embalse 46,28 hm³, totalizando 84,21 hm³, desde 1966 hasta 2012. Se estima que en el resto del embalse de Mequinenza se depositaron 73,97 hm³, totalizando 116,25 hm³ en el período 1982-2012. Si acumulamos a estos sedimentos los 95,42 hm³ del periodo anterior a 1982, totalizan 211,67 hm³.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN
SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

5. La actual tasa de sedimentación del embalse de Mequinenza se estima en 4,36 Mt/año, equivalente a 3,87 hm³/año.
6. Los sondeos realizados entre los puntos kilométricos 72 y 90 del embalse en 2012 han permitido caracterizar el sedimento en este tramo de embalse. Se calcula que, de los 40,2 hm³ de sedimento que existen en este tramo, 10,7 hm³ son de arena y 3,7 hm³ son de grava.
7. La información batimétrica disponible hoy en día no permite conocer con certeza la sedimentación existente en Mequinenza. En el presente estudio se ha realizado un análisis de la información disponible, al objeto de calibrar un modelo simplificado de su evolución sedimentaria. Es por ello necesario realizar nuevos estudios batimétricos para disponer de valores más precisos que están ya en fase de licitación por parte de la Dirección General del Agua.

Respecto al embalse de Ribarroja:

8. La batimetría de 2007 incluida en el “Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja” (Grupo Flumen, 2009) indica que el volumen de sedimento retenido estaba, en esa fecha, entre 13 y 16,6 hm³.
9. Los estudios realizados en el presente informe permiten estimar que en la actualidad (2020) la sedimentación de Ribarroja se encuentra entre 15 y 19,3 hm³. No obstante, la información batimétrica disponible no permite conocer con plena certeza la sedimentación existente en el embalse.
10. Partiendo del valor medio del rango de sedimentación, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0.55 Mt/año, valor que desciende prácticamente a la mitad, 0.26 Mt/año, en el período 2004-2016.
11. No se dispone de información sedimentológica que permita caracterizar el sedimento del embalse, por lo que al igual que en Mequinenza, se encuentra en licitación los trabajos para la caracterización adecuada de los sedimentos existentes.

En cuanto al tránsito de sedimentos hacia el curso bajo del Ebro:

12. En el presente informe se estima que en la actualidad (2020) la tasa de transporte de sedimentos en suspensión aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Ribarroja y Flix es de 0,37 Mt/año (durante los primeros años de tras la puesta en explotación de las presas era de 0,83 Mt/año). Al igual que en el caso anterior, a estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.



13. En la actualidad todo el material de arrastre de fondo de la cuenca del Ebro aguas arriba de Mequinenza, y de las cuencas de los ríos Cinca y Segre, queda retenido en la cola de los embalses. El único sedimento que sale de Mequinenza es el disuelto, que no tiene ninguna influencia en la dinámica sedimentológica del curso bajo. El único sedimento en suspensión que circula por el Ebro a la altura de Flix, es el no retenido en Ribarroja que se estima en un 60% de las aportaciones conjuntas de las cuencas del Cinca y del Segre.

LA MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS EN RIBARROJA Y MEQUINENZA:

14. La CHE ha evaluado en el estudio “Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix”, la posibilidad de restaurar el tránsito sedimentarios en la zona, llegando a la conclusión de que “Las únicas alternativas viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix son la retirada mecánica mediante excavación en seco (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix)”. La viabilidad de la retirada mecánica debe analizarse mediante un estudio económico específico, pero los valores más favorables recopilados en la literatura suponen unos costes muy elevados. Con relación a las medidas de evacuación hidrodinámica, requieren condiciones muy singulares, que no se dan en los embalses del sistema, por lo que las efectividades esperables son muy bajas”.
15. La remoción de sedimentos del embalse de Ribarroja mediante la técnica hidrodinámica de lavado es la actuación más factible, si bien con una efectividad de carácter limitado. Sin embargo, el vaciado del embalse de Ribarroja y el flujo de sedimentos aguas abajo puede generar impactos socioeconómicos y medioambientales de gran magnitud.
16. Puede considerarse como el punto más crítico la posible necesidad de parar las centrales nucleares de Ascó y Vandellós, al dejar de estar operativa la central hidroeléctrica de Ribarroja, que les da respaldo de seguridad.
17. Los usos recreativos del embalse de Ribarroja basados en la pesca de especies alóctonas y en especial del siluro, se verían dramáticamente dañados y tendrían que esperar varios años para recuperarse.
18. Dependiendo de la duración del vaciado, pueden producirse graves efectos en el espacio natural de los Aiguabarreig Cinca-Segre.
19. Si la operación de lavado fuera exitosa, existía un riesgo elevado de una acumulación excesiva de sedimentos a lo largo del cauce aguas abajo que afecte a numerosos elementos: espacios naturales y ecosistemas acuáticos, tomas de abastecimiento y regadíos, navegación recreativa.



EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS POR EL RÍO EBRO HASTA EL DELTA DEL EBRO Y EL PAPEL DE LA CUENCA AGUAS ABAJO DE FLIX.

20. La movilización de los sedimentos en el río Ebro desde el embalse de Flix hasta su llegada al Delta del Ebro debe ser estudiada con profundidad. Es necesario conocer detalladamente la geometría del río Ebro y el estado del lecho del mismo, de forma que puedan realizarse modelos numéricos y ensayos que permitan conocer la capacidad de transporte del río y los tiempos de tránsito del sedimento hasta su llegada al Delta.
21. Es necesario igualmente estudiar la cuenca aguas abajo de Flix, no solo como una posible fuente de sedimentos, sino también como ensayo piloto de metodologías que puedan aplicarse posteriormente al río Ebro.
22. Igualmente, es importante el estudio de los azudes y otros obstáculos existentes en el río Ebro y afluentes, para, en su caso, mejorar la continuidad fluvial y favorecer el transporte de sedimentos asociado, de forma que se facilite el tránsito sedimentario y se optimicen los tiempos de llegada de los sedimentos al Delta.
23. Existen ya experiencias positivas, en especial las incluidas en el proyecto Life Ebro ADMICLIM, en el que se han realizado varias pruebas piloto de inyección de sedimento en el tramo final del río Ebro y en la red de canales de riego del Delta, cuyos resultados y experiencias deben ser la base de las acciones futuras.
24. Las crecidas controladas del río Ebro deben desarrollar un relevante papel en este proceso, como fuente esencial de energía para la movilización del sedimento futuro, pero por el contrario, deben ser compatibles con los usos del suelo y con el equilibrio del lecho del río.

RESUMEN DEL PLAN DE ACTUACION PREVISTO:

A partir de la información anteriormente citada, se presentan las siguientes actuaciones a ejecutar en los próximos meses:

1. Caracterización cartográfica y sedimentaria de la cuenca aguas abajo de Flix. Se encuentra ya contratado la realización de estudios de detalle de la caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Ciurana, Guiamets y Margalef y de sus cauces asociados, como posibles casos piloto para el estudio de la circulación de sedimentos hasta el Delta del Ebro.
2. Cartografía de detalle del eje el Ebro desde Flix hasta el Delta del Ebro. Se encuentra ya contratado la realización de la cartografía de detalle del eje del Ebro desde Flix hasta el Delta del Ebro, incluyendo la granulometría y estado



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN
SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

del sustrato del río, de forma que permita una adecuada modelización matemática del transporte de sedimentos a lo largo del eje del Ebro y sus afluentes.

3. Cartografía del embalse de Mequinenza y caracterización de sedimentos existentes en Mequinenza y Ribarroja. Igualmente, en estos momentos está en licitación la realización de una batimetría actualizada de Mequinenza (en Ribarroja recientemente se ha realizado una nueva batimetría por el titular del embalse) y la caracterización del estado de los sedimentos, volumen y granulometría de los embalses de Mequinenza y Ribarroja.
4. Modelación hidrodinámica del tránsito de sedimentos desde los 5 embalses estudiados hasta el Delta del Ebro. Con toda esta información, el CEDEX procederá, con el asesoramiento de distintas universidades y expertos, a realizar los estudios hidrodinámicos necesarios para valorar la posibilidad de estudiar con detalle alternativas que permitan mejorar el tránsito sedimentario en el tramo bajo del río Ebro, tanto de la cuenca propia como de los embalses aguas arriba, en función de la mejora del conocimiento científico-técnico, y teniendo en cuenta las potenciales afecciones que puede producir contaminación de los sedimentos en esta zona, considerando además la posibilidad de mejorar el régimen de las crecidas controladas en el río Ebro aguas abajo del embalse de Flix, para controlar la población de macrófitos y mejorar el transporte sólido, así como continuar trabajando para asegurar el adecuado estado de mantenimiento de los desagües de fondo de las presas de la cuenca del Ebro. En estos estudios se tendrán en cuenta de manera especial aquellos trabajos similares que haya realizado con anterioridad la Agencia Catalana del Agua u otros organismos de la Generalitat, garantizando la coordinación necesaria para evitar duplicidades y avanzar sobre el conocimiento y la experiencia existente.
5. Estudio de las barreras transversales existentes en los cauces aguas abajo de Flix y propuesta de proyectos de permeabilización que permitan una adecuada mejora del tránsito sedimentario, de forma que se minimicen los efectos de las obras transversales existentes.
6. Diseño de un protocolo de gestión de los sedimentos. A partir de los resultados anteriormente citados, y con todas las experiencias existentes, se procederá a redactar un protocolo de actuación que establezca un marco técnico científico de actuación que permita la mejora del régimen sedimentario del Delta del Ebro. Este protocolo deberá basarse en pruebas y ensayos piloto que permitan buscar metodologías eficaces y que minimicen los efectos económicos y ambientales de estas actuaciones.
7. Creación del Observatorio Hidrológico del Delta del Ebro, puesto que es imprescindible recuperar y mantener un sistema de seguimiento y monitorización de todos los datos hidrológicos del Delta del Ebro, a través de la potenciación de la RIADE y realización de estudios para medir la subsidencia con datos empíricos o a partir de las imágenes de satélite y con ello, dotarnos



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

de herramientas técnico científicas coordinadas entre la Dirección General del Agua, Dirección General de la Costa y el Mar, Confederación Hidrográfica del Ebro, la Generalitat de Catalunya, en especial a través de Agencia Catalana del Agua, que permitan monitorizar la evolución del Delta y el impacto tanto del cambio climático como de las medidas que se van implantando.

Y que todo ello colabore en el resto de medidas incluidas en el ETI, en el nuevo Plan Hidrológico del Ebro y en el Plan de Protección del Delta del Ebro, y con ello, poder implantar medidas que permitan además dar seguimiento a los trabajos y recomendaciones elaboradas en el marco de la “Taula de consens pel Delta”.



2. INTRODUCCIÓN

El esquema de temas importantes (ETI) del tercer ciclo de la planificación hidrológica de la cuenca plantea la mejora de la resiliencia del delta del Ebro y su costa, de especial actualidad aún tras su inundación por la tormenta Gloria a finales de enero de 2020.

Tal y como se recoge en el ETI, el crecimiento del delta del Ebro se relaciona directamente con un régimen hidrometeorológico asociado con avenidas frecuentes, y con una evolución particular de los usos del suelo y las masas forestales en la cuenca, como consecuencia de la actividad humana. Hoy en día el delta es un espacio muy antropizado, donde se ha estimado una pérdida de los hábitats originales más continentales (marismas de tipo Cladium, praderas salinas y vegetación ribereña) del 90% mientras que en los hábitats más costeros (lagunas costeras, ambientes arenosos, tipo Salicornia) la reducción sería de alrededor del 70%.

El cambio climático provocará la previsible elevación del nivel del mar, un incremento de temporales, y una mayor temperatura y acidificación. Se ha registrado un aumento del nivel del mar de entre 2 y 3 mm/año durante el último siglo, con importantes variaciones en la cuenca mediterránea, por efectos regionales. Respecto al oleaje, en las últimas 6 décadas se han observado importantes cambios tanto en su intensidad como en su dirección. Las zonas más vulnerables son la parte exterior costera, el cauce inferior o zona estuárica, las lagunas y las bahías.

La existencia de periodos secos o cálidos, conjuntamente con las actuaciones agroforestales humanas, han sido determinantes en la tasa de desarrollo del delta, a lo que se ha unido la construcción de embalses de regulación para satisfacer el desarrollo socio-económico de la demarcación. Todos estos factores contribuyen a disminuir la génesis de sedimentos en la cuenca y, por tanto, han afectado a la dinámica sedimentaria del delta, un medio frágil en constante adaptación a las fuerzas que lo configuran.

Por otro lado la invasión de especies exóticas invasoras se vincula a flujos globales, destacando los asociados a los medios de transporte, a la elevada actividad de navegación recreativa y pesca, aunque la causa concreta de la presencia de cada una de las especies invasoras es de muy compleja determinación. Recientemente se ha cuantificado en 200 el número de especies exóticas invasoras presentes en el Delta del Ebro.

De cara al tercer ciclo de planificación hidrológica, el ETI informado por el Consejo del Agua de la cuenca del Ebro el 30 de diciembre de 2020, plantea las siguientes actuaciones:

1. Plantear una propuesta piloto de zona de amortiguamiento en la franja costera del delta del Ebro para valorar su efectividad ante el incremento del riesgo de inundación del mar.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN
SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

2. Continuar con el mantenimiento y explotación de las estaciones priorizadas de la red RIADE y valorar la posibilidad de poner en funcionamiento alguna nueva estación.
3. Evaluar el impacto de la modernización de las instalaciones de riego del delta del Ebro.
4. Continuar con los estudios de I+D+i relacionados con el delta del Ebro. Entre ellos destacan: i. los estudios para valorar la posibilidad de recuperar el tránsito sedimentario en el tramo bajo del río Ebro, en función de la mejora del conocimiento científico-técnico y teniendo en cuenta las potenciales afecciones que puede producir contaminación de los sedimentos en esta zona, especialmente en Flix; ii. los estudios para medir la subsidencia con datos empíricos entre los que destaca realizar una medición de los puntos de la red topográfica creada con la RIADE (Acuamed, 2012); y iii. los estudios de subsidencia a partir de las imágenes de satélite. Todo esto tiene su concreción en el documento preliminar del “Plan para la protección del delta del Ebro”.
5. Continuar e intensificar las campañas de prevención, seguimiento, control y erradicación de especies exóticas invasoras del delta y la realización de estudios de I+D+i.
6. Ejecución de los proyectos relacionados con el saneamiento y depuración de los núcleos de población del delta: Poblenou, Deltebre, urbanizaciones de Riumar y Eucaliptus.
7. Plantear posibles medidas de reducción del retroceso de costa en algunos sectores del hemidelta izquierdo, desde la playa de las Marquesas a Riumar, y en el hemidelta derecho, barra del Trabucador e Illa de Buda.
8. Plantear medidas para ralentizar la colmatación de la bahía del Fangar y para mejorar la calidad de sus aguas desde el punto de vista de la consecución del buen estado, de manera compatible con la producción marisquera que en ella existe.
9. Ejecución de caminos de guarda de protección perimetral en las bahías de los Alfaques y el Fangar.
10. Ejecución de una ruta fluvial verde en la margen izquierda del río entre Tortosa y la desembocadura.
11. Creación de una zona de amortiguamiento en la zona de “Bombita” en el frente costa-laguna, interacción de masas de agua de laguna y costera.
12. Desarrollar nuevas propuestas de gestión de algunos humedales del delta del Ebro para mejorar sus condiciones ambientales (CGRCDE-CRSAE, 2017).



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN
SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

13. Mantener e incluso potenciar los medios de coordinación de los programas de medidas de la planificación de las estrategias marinas y de la planificación hidrológica. Plantear propuestas de soluciones para reducir el impacto de los plásticos en la demarcación marítimo-balear. Continuar con las campañas “Por un delta limpio”.
14. Dar seguimiento a los trabajos y recomendaciones elaboradas en el marco de la “Taula de consens pel delta”. En la valoración de sus conclusiones deberán contemplarse los criterios de la Administración costera, ya que su incidencia resulta especialmente relevante.
15. Continuar trabajando para asegurar el adecuado estado de mantenimiento de los desagües de fondo de las presas de la cuenca del Ebro y su gestión eficaz, para evacuar los sedimentos que son susceptibles de ser movilizados mediante este mecanismo.
16. Continuar con las crecidas controladas en el río Ebro aguas abajo del embalse de Flix para controlar la población de macrófitos y mejorar el transporte sólido.
17. Tener en consideración los ecosistemas marinos y costeros asociados a la desembocadura para la determinación del caudal ecológico de la desembocadura del río Ebro.

Este documento recoge el plan de acción a seguir para desarrollar coordinadamente con el resto de autoridades y, en especial, con la Dirección General para la Costa y el Mar y la Generalitat de Cataluña en las medidas relacionadas con el régimen sedimentario del Delta, en especial la segunda y la cuarta anteriormente citadas.



3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL TRANSPORTE DEL SEDIMENTO EN EL TRAMO BAJO DEL RÍO EBRO. REVISIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

3.1. Introducción

Durante los últimos años se han realizado una gran cantidad de estudios técnicos, promovidos fundamentalmente por la Confederación Hidrográfica del Ebro y por la Dirección General del Agua, encaminados a caracterizar el tránsito sedimentario en el curso bajo del río Ebro y en las entradas en los embalses de Mequinenza y Ribarroja. En concreto, los principales estudios desarrollados han sido los siguientes:

- Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-octubre de 1970 (CEDEX, 1971)
- Plan Indicativo de Usos del Dominio Público Litoral del Delta del Ebro (Dirección General de Costas, 1978)
- Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (CEDEX, 1982)
- El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro (CEDEX, 2002; inédito)
- Balanç de sediment del tram final del riu Ebre (ACA, 2009)
- Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja (Flumen, 2009). Este estudio incluye una batimetría de Ribarroja realizada en 2007
- Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2011)
- Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008 (Tragsatec, 2012). Este estudio incluye una batimetría del embalse de Mequinenza realizada por la empresa EcoHydros en 2008
- Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2012)
- Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del Tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix (Universidad Politécnica de Madrid, 2018)

De la relación de los anteriores estudios, los que mayor valor tienen para la caracterización de los sedimentos, en el bajo Ebro y en el entorno de los embalses de Mequinenza y Ribarroja, son los que incluyen estudios batimétricos.

En una Nota Técnica emitida en mayo de 2020 elaborada por el CEDEX se incluyó un resumen de los principales contenidos de todos estos trabajos; en este documento únicamente se han recogido las conclusiones de los trabajos utilizados en los estudios realizados por el CEDEX.

Además de estos estudios técnicos, durante los últimos 50 años la comunidad científica ha realizado un gran número de publicaciones en revistas técnicas y de



presentaciones en congresos científicos, en relación con el tránsito sedimentario en el bajo Ebro. Muchos de estos trabajos han sido tenidos en cuenta en el desarrollo de los anteriores estudios.

Por último, para un mejor seguimiento del contenido de este apartado (y de todo este documento) en el esquema de la figura adjunta se ha representado la ubicación de las principales infraestructuras, emplazamientos y cursos fluviales del entorno del bajo Ebro que intervienen en el presente estudio.

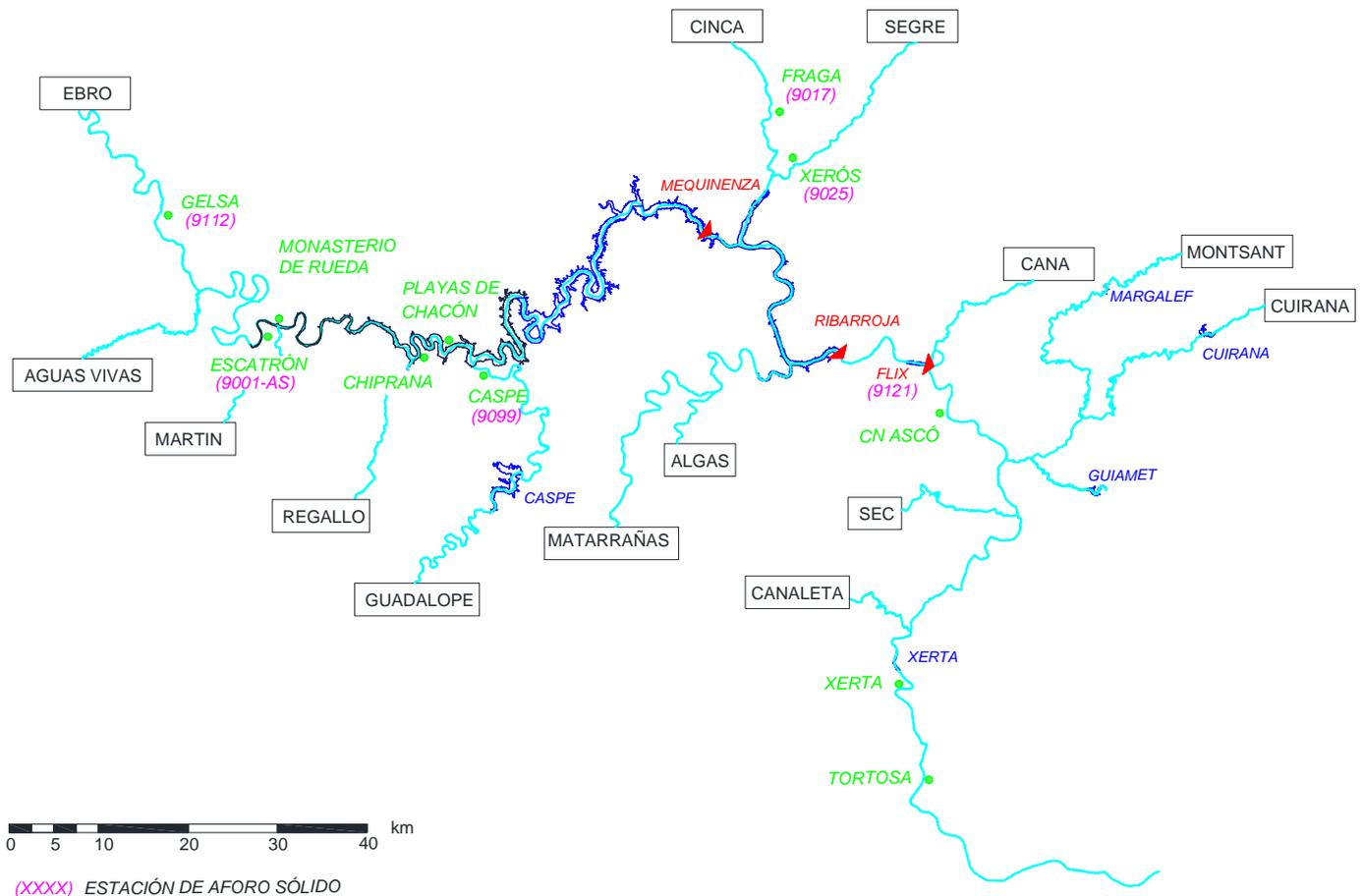


Figura 1. Esquema de la zona de estudio del río Ebro. Incluye indicaciones de los principales afluentes y embalses.

3.2. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-octubre de 1970 (CEDEX, 1971)

Este estudio realizado por el CEDEX tras los primeros años de puesta en servicio del embalse de Mequinenza tenía como fin evaluar su capacidad. Para ello se realizó un vuelo fotogramétrico y una batimetría con sonar, con la que se obtuvieron perfiles transversales. La figura 2 muestra los tramos que se emplearon para su cubicación. La capacidad obtenida con el embalse a la cota 121.15 msnm fue de 1565.91 hm³, frente a los 1530 hm³ de capacidad teórica.



En el presente trabajo se han agrupado algunos de estos tramos en un total de 51, cuyas características (longitud de los tramos y volúmenes) pueden verse en la Nota Técnica de mayo de 2020.

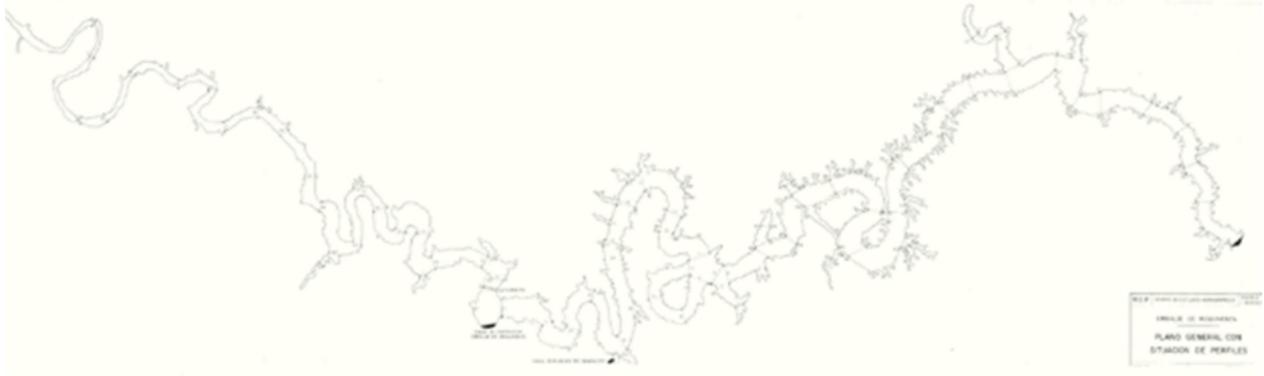


Figura 2. Tramificación del embalse de Mequinenza

3.3. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (CEDEX, 1982)

Los trabajos de campo de este nuevo estudio consistieron en un vuelo fotogramétrico y un levantamiento batimétrico con sonar, que permitieron restituir las curvas de nivel del vaso. Estas curvas fueron digitalizadas posteriormente y se dispone de ellas en formato vectorial (figura 3). En este trabajo se estimó que la sedimentación acumulada en el período 1966-1982 fue de 92 hm³.

Para facilitar el análisis comparativo que se mostrará posteriormente en el apartado 3 de este documento, en los estudios recopilados en la Nota Técnica de mayo de 2020 se cubió la capacidad de los mismos tramos indicados en la figura 2, concluyendo que la capacidad de embalse a la cota 121.15 msnm es de 1387.87 hm³.

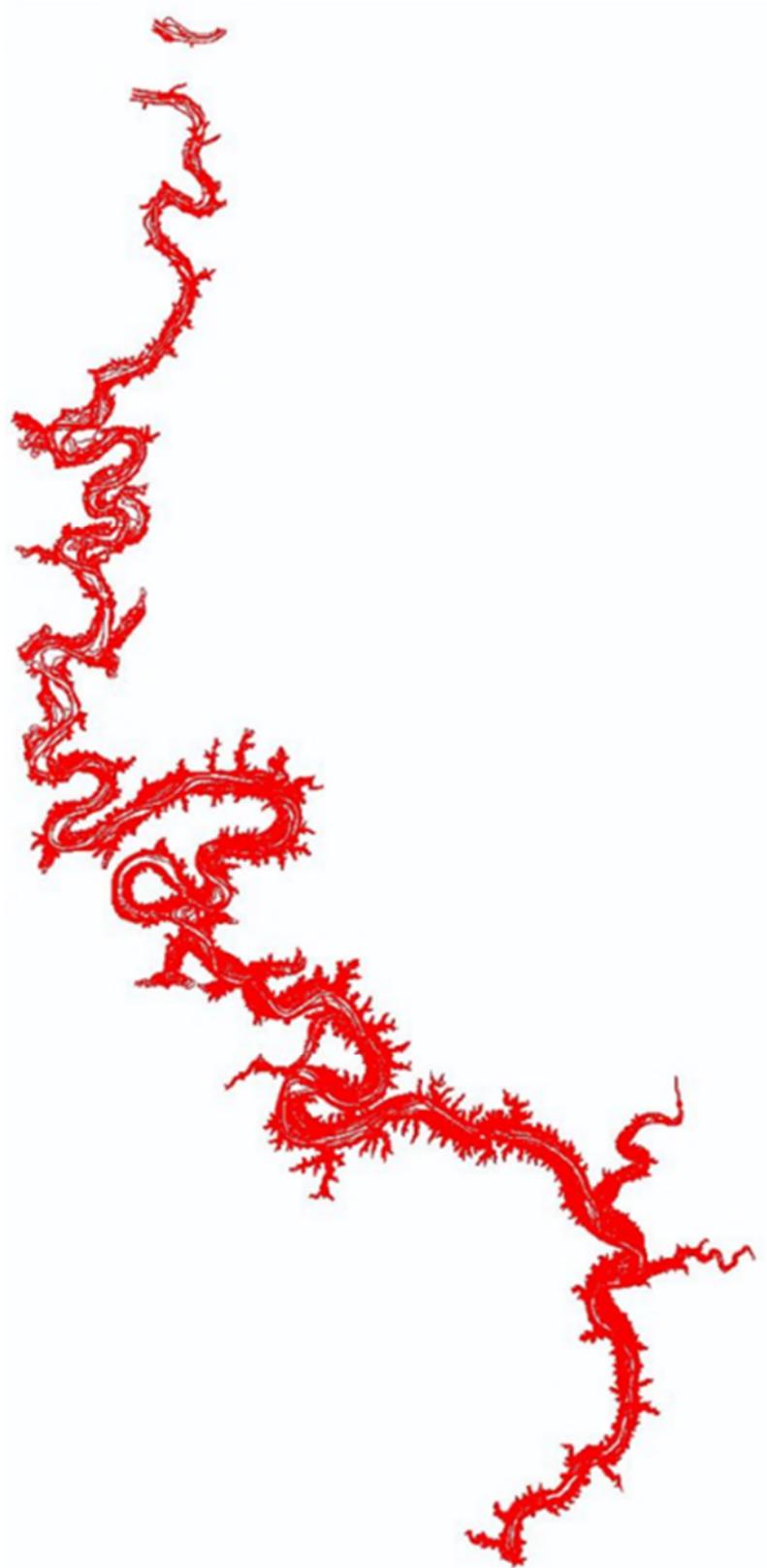


Figura 3. Curvas de nivel de la batimetría CEDEX del embalse de Mequinenza (1982)



3.4. El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro (CEDEX, 2002; inédito)

En el marco de la Documentación Técnica elaborada para la realización del Plan Hidrológico Nacional, el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX redactó en 2002 el documento “El medio ambiente hídrico en el delta del Ebro” en el cual se estudiaron los aportes sólidos al Delta del Ebro, entre otros aspectos. Este estudio contiene aportaciones propias que son relevantes para el presente trabajo. Al ser un documento interno de carácter inédito, en la Nota Técnica de mayo de 2020 se transcribió íntegramente el apartado de “Aportes Sólidos en el Delta” para facilitar su consulta.

La estimación de los aportes sólidos del río (tanto en la situación natural o de referencia como en la situación actual con los embalses existentes en la cuenca), se realizó en este documento mediante dos procedimientos. En primer lugar, analizando los registros batimétricos de sedimentación de los embalses y, en segundo lugar, mediante los registros de aforos sólidos.

Del primero de los análisis se concluye que se han producido aterramientos significativos en todos los embalses de la cuenca. Y que en la situación real (con embalses), en Mequinenza los aterramientos casi alcanzan los 7 Mt/año, mientras que los que recibe el embalse de Ribarroja, y que provienen fundamentalmente de la cuenca no controlada del Segre, son del orden de 1,35 Mt/año. Finalmente estima los aportes en Tortosa en unos 0,2 Mt/año. Además indica que, en los embalses donde se ha realizado estudios sedimentológicos, el porcentaje de arenas es inferior al 10 % en la mayoría de los embalses.

Mediante el registro de sedimentación de los embalses, se obtuvo un mapa de aportes sólidos por unidad de superficie (t/ha/año) generados en la cuenca del Ebro. Esto permite calcular que en la situación de referencia -sin embalses- la aportación de sedimentos al delta del Ebro sería de 14 Mt/año, de los que 9 Mt/año corresponderían a la cuenca del Ebro en el punto en donde se sitúa el embalse de Mequinenza y del orden de 5 Mt/año a la cuenca del Segre. Los aportes generados por unidad de superficie en la cuenca del Segre serían, por tanto, más del doble de los generados en la cuenca del Ebro vertiente a Mequinenza, lo que tiene su explicación en la mayor magnitud de las crecidas del Segre, en comparación a las del resto de la cuenca.

Como resultado del análisis realizado con aforos sólidos, se concluyó que, con carácter general, este procedimiento proporciona valores muy inferiores a los obtenidos a partir de las batimetrías (los sólidos en suspensión en el Ebro y en el Segre son por este método del orden de 0,8 y 0,4 Mt/año). De acuerdo con este documento, la causa de esta diferencia reside en que las campañas de aforo no se realizan durante los episodios de avenida, donde las cargas de sedimento son mucho mayores.

3.5. Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja (Grupo Flumen, 2009)

Este estudio realizado por el Grupo Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña, analizó en detalle el transporte de sedimentos en el entorno del embalse de Ribarroja



en el periodo comprendido entre el 25/11/1997 y el 19/09/1999. Desde un punto de vista de aportación de caudales, este periodo puede considerarse moderadamente seco tanto para el río Ebro como para el Cinca y el Segre. Solo se presentó una avenida (diciembre de 1997), que puede calificarse de moderada: caudales medio diarios de 1423 m³/s en el Ebro, 890 m³/s en el Cinca y 974 m³/s en el Segre. Las principales conclusiones alcanzadas fueron:

1. Los embalses de Mequinenza y Ribarroja retienen la totalidad del transporte de fondo y la mayor parte del transporte sólido en suspensión, estimando que el transporte de fondo en la entrada al embalse de Mequinenza representa menos del 1% de los sedimentos aportados por el Ebro.
2. En el embalse de Mequinenza, a lo largo del periodo estudiado, se depositó el 95,4% de las 1.400.000 t de sólidos en suspensión que entraron. La concentración media a la entrada fue de 96 mg/l mientras que a la salida fue de 5.9 mg/l.
3. En dicho período de casi 22 meses se almacenaron 510.000 t de sedimento aportado por transporte en suspensión. La retención en Ribarroja fue del 40,7%, debido a que el tiempo de residencia en el embalse de Ribarroja es notablemente más corto que en el de Mequinenza, especialmente durante las crecidas cuando el aporte sólido es mayor. Las concentraciones medias fueron:
 - a. En el Ebro, a la salida de Mequinenza : 5,9 mg/l
 - b. En el Segre, en Serós: 45,3 mg/l
 - c. En el Cinca, en Fraga: 262 mg/l
 - d. En el Ebro, a la salida de Ribarroja: 19 mg/l
4. La mayor parte de la aportación sólida en suspensión a los embalses (y por tanto también su retención) se produce durante las crecidas. En el periodo estudiado, el 50% de la retención total se produjo en el 7% del total de días en Mequinenza y en el 3% en Ribarroja.
5. En los embalses se incrementa la carga orgánica de los sedimentos en suspensión.
6. De acuerdo con la batimetría realizada entre finales de octubre y principios de noviembre de 2007, el volumen de sedimento en el embalse de Ribarroja se acota ente 13 y 16,6 hm³. Aproximadamente 5 hm³ de sedimentos (un 30% del total) se sitúan en los 5 primeros kilómetros del embalse y otro tercio se sitúa en torno a la desembocadura del Matarraña.
7. En la mayor parte del embalse, el sedimento es de textura limo-arcillosa, con un tamaño medio de partículas inferior a 25 micras. Excepcionalmente, en las zonas litorales, en el frente anterior de la lengua de sedimento procedente del río Segre y en una pequeña área de la zona de meandros, se observa un incremento de la proporción de arena en detrimento de la de limos, determinando un tamaño medio de partículas que varía entre 45 y 100 micras.



3.6. Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2011)

En el marco de este estudio de Control de Obra Civil para la CHE se realizó una campaña de 10 sondeos y 27 catas, entre los PK 74 al 94, medidos por el eje del río Ebro, con origen en la presa de Mequinenza. La figura 4 muestra la ubicación de los puntos donde se realizó la prospección. El detalle de las características de las columnas estratigráficas de los sondeos puede consultarse en la Nota Técnica de mayo de 2020, apreciándose en todos los casos una primera capa de arenas y limos sobre una capa de gravas que debe corresponderse con el cauce natural. No se dispone de curvas granulométricas que permitan determinar el tamaño de las arenas y las gravas.

Esta información ha sido de gran utilidad para poder realizar la caracterización del sedimento de la cola del embalse de Mequinenza (ver apartado 3.6).



Figura 4. Situación en planta de las catas y sondeos



3.7. Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2012)

Se trata de un trabajo encargado por la CHE, que complementa otros estudios realizados anteriormente (ver apartado 2.1) por Ecohidros (2008), Control de Obra Civil (2011) y Tragsatec (2012). En el momento de la realización de ese estudio, el nivel del embalse se encontraba a la cota 100.5 msnm, dejando emergido los últimos 55 km del embalse. Esto permitió realizar una nivelación de precisión del tramo, con la que se ha podido generar una topografía con curvas de nivel vectorizadas (figura 6). Con el fin de establecer un escenario de comparación se digitalizó la topografía de 1961 (figura 5), aunque solamente se vectorizó el tramo final del embalse. Con cada una de estas geometrías se generó un MDT y por diferencia se obtuvo el volumen de sedimento en la cola del embalse. Para completar la cubicación del sedimento se empleó la batimetría de Ecohidros de 2008. Este trabajo arroja un volumen de sedimentos en el embalse de Mequinenza de 76.8 hm³, con el reparto espacial que se indica en la figura 7.

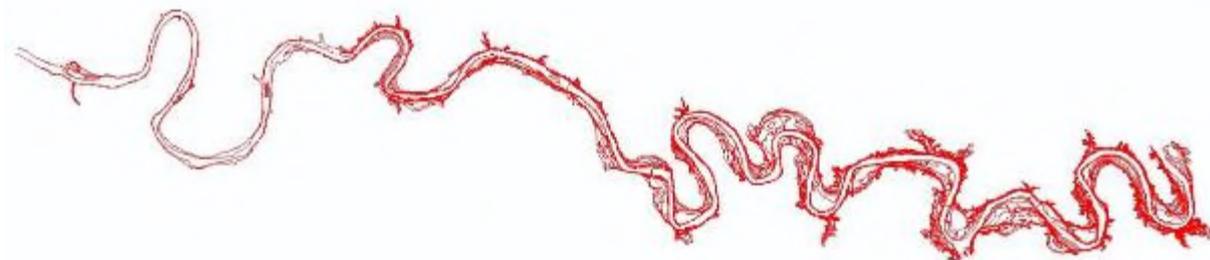


Figura 5. Curvas de nivel de la cola del embalse de Mequinenza en 1961

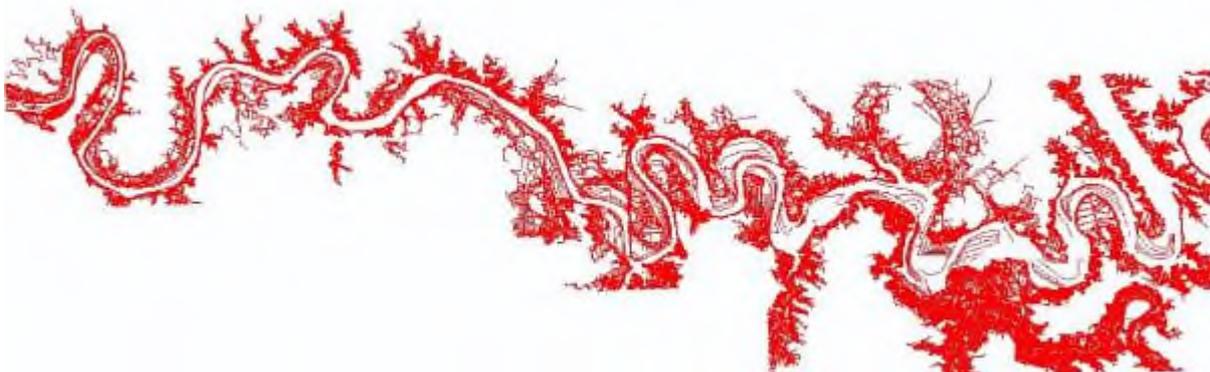


Figura 6. Curvas de nivel de la cola del embalse de Mequinenza en 2012

Este estudio hace, además, una descripción del tipo de sedimento y de su distribución a lo largo del eje del embalse. Comenzando el recorrido desde la cola, hay un tramo con poca sedimentación debido a que las oscilaciones del nivel de embalse permiten que el sedimento se arrastre durante los episodios de avenida. Del PK 100 al 90 comienza a detectarse más sedimento en el cauce aunque de poca entidad. Posteriormente hay una zona en la que se produce la mayor acumulación del sedimento, desde el PK 90 a 45, especialmente entre Chiprana (PK 80) y la desembocadura del Guadalope (PK57). Destaca la acumulación de sedimentos que



se produce entono al PK 50 manteniéndose en niveles de sedimentación más bajos hasta la presa (figura 7).

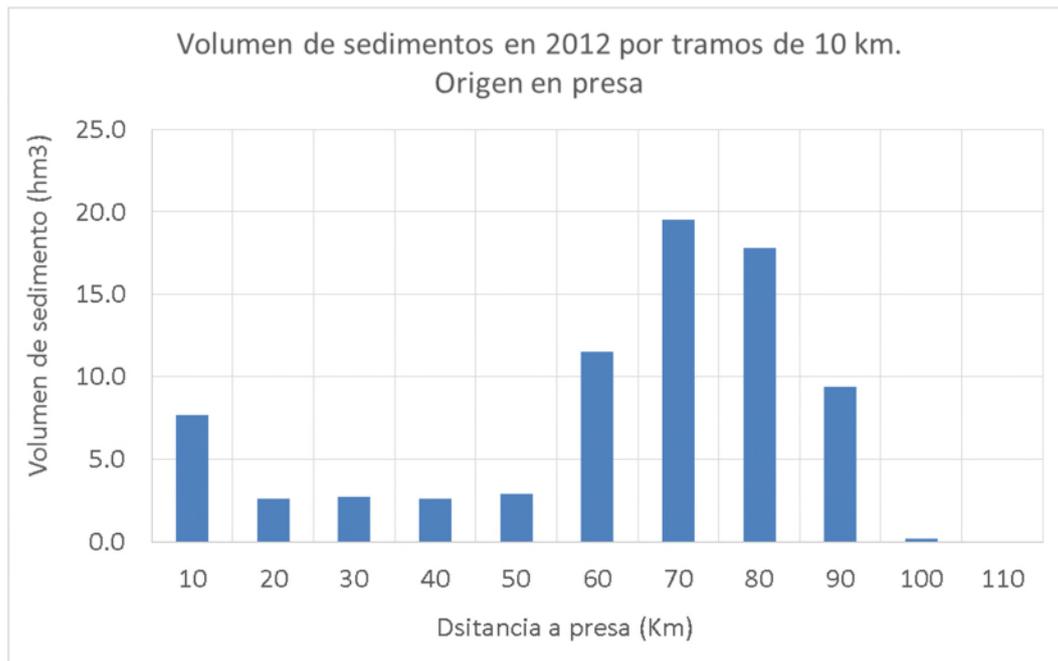


Figura 7. Reparto del sedimento en el embalse de Mequinenza en 2012. Elaborado con los datos del estudio de Control de Obras (2012)

En 1969 se proyectó un paso de barcas para conectar las dos orillas a 2 km aguas abajo de la población de Chiprana. La sedimentación lo hizo inviable, obligando finalmente a construir un puente que se proyectó en 1975. El estudio de Control de Obras de 2012 incluye las referencias al proyecto del puente de Chiprana, entre las que se incluyen los sondeos realizados para el proyecto de este puente.

El análisis de estos sondeos indica que, desde el llenado del embalse en 1966 y hasta 1975, se produjo una sedimentación de limos con un espesor variable entre 2.5 y 7.5 m a lo largo de la sección transversal. Debajo de esa capa de limos se aprecia un estrato de gravas en el cauce principal. En los sondeos de 2011 de Control de Obra Civil (ver apartado 2.6) se obtuvieron resultados similares, lo que corroboró que desde entonces se mantiene la sedimentación en la zona de Chiprana.

3.8. Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix (Universidad Politécnica de Madrid, 2018)

El objeto del estudio fue analizar las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix mediante la integración de los datos de sedimentos acumulados y las características del flujo hidrológico que se dan en estos en estos embalses.

Este estudio hace una revisión exhaustiva de la literatura técnica sobre el sedimento y la información hidrológica del sistema de embalses MRF, con el fin de caracterizar el flujo sedimentario en el mismo. Así mismo, revisa las experiencias de movilización de sedimentos a nivel internacional, para finalmente analizar las posibilidades reales de movilización del sedimento.



Las conclusiones fundamentales de este estudio son:

- En la actualidad este flujo se ha reducido de manera considerable, tanto aguas arriba como aguas abajo de los embalses del sistema MRF. Las entradas al sistema están en torno a 1 Mt/a, que es menos de la décima parte del flujo inicial.
- La mayor parte de los sedimentos (80%) entran al sistema por el río Ebro. El río Cinca aporta un 15% del total y el resto de la cuenca del Segre, otro 5%. Se estima que Mequinenza retiene el 95% del sedimento en suspensión y Ribarroja el 40%.
- La carga media anual aguas abajo de las presas es inferior a 0,5 Mt/a, con el 60% transportado en suspensión y el 40% como carga de fondo. Según los investigadores, la mayor parte de este material procede de la erosión en el lecho del propio río.
- El sedimento acumulado en Mequinenza se encuentra en el rango comprendido entre 75 hm³ y 100 hm³, lo que supone entre un 5% y un 6,5% de su capacidad original. La acumulación en Ribarroja es de unos 13,1 hm³, un 4,5% de su capacidad original.
- Las únicas alternativas técnicamente viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema MRF son la retirada mecánica mediante excavación en seco o dragado (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix).

3.9. Resumen y conclusiones

De la revisión de los estudios incluidos en los anteriores apartados puede concluirse, en primer lugar que, por diferentes motivos, entre los que pueden destacarse factores climáticos o los usos del suelo de la cuenca, el río Ebro fue en el pasado un río hidromorfológicamente muy activo, con una gran carga de sedimentos que generó la formación deltaica de su desembocadura. Hay estimaciones del transporte de sedimentos en la desembocadura del Ebro de finales del siglo XIX, que lo evalúan (Gorría, 1877) en 25 Mt/año. Sin embargo, la evolución de estos mismos factores, y la acción antrópica, ha ido reduciendo este transporte. Bayerri (1935) estimó el transporte entre 15 y 20 Mt/año en Tortosa a principios de Siglo XX. Catalán (1969) estima esta carga con mediciones en el período (1961-1963) en 2 Mt/año. Esta reducción de transporte se hace notar en la evolución del Delta, por ejemplo, el mapa topográfico de 1950 muestra un ligero retroceso del cabo de Tortosa.

El transporte de sedimento en suspensión se produce de manera continua por el cauce, aunque con mayores concentraciones en situaciones de avenida. Sin embargo, el transporte de fondo que es el que configura hidromorfológicamente el cauce, se produce únicamente durante los episodios de avenida. Se estima que entre 80 y 95% de la carga de sedimento que transporta el río es material fino (arcillas y limos) en suspensión, y entre el 5 y el 15% arena y grava (Lechuga y López, 1997).

En la actualidad existen en la cuenca del Ebro más de 100 embalses (de más de 1 hm³), con una capacidad total que supera los 7.500 hm³. Por tanto, el régimen de



caudales del río se encuentra muy modulado, y el efecto barrera de los embalses hace que el transporte de sedimento se vea muy reducido en el curso bajo del Ebro.

Los embalses que más alteración generan en el curso bajo son los de Mequinenza (1964-66) y Ribarroja (1958-67). La influencia de Flix (1945-48) es mucho menor, al estar situado aguas abajo de ellos y tener una capacidad muy reducida.

Muchos de los estudios consultados incluyen estudios o información sobre el volumen de sedimentos acumulados en los embalses de Mequinenza y Ribarroja, estimándose que, en la actualidad, estas acumulaciones de sedimentos oscilan entre las horquillas de 80 a 150 hm³ y de 13 a 19 hm³ para el primero y el segundo, respectivamente.

Sanz y otros (2001) evidencian el cambio de comportamiento hidromorfológico del cauce aguas abajo del complejo Mequinenza-Ribarroja-Flix (MRF), antes y después de su construcción. La avenida del 29 de octubre de 1937, con un caudal de 10.000 m³/s, generó una importante transformación hidromorfológica del cauce, movilizándolo y transformando barras aguas arriba de la desembocadura del río Ciurana. En esta avenida se produjo el cambio de orientación de la desembocadura del Ebro hacia el norte, que dio lugar a la involución del cabo de Tortosa. Las fotografías aéreas de 1982, 1987 y 1997, muestran cómo las avenidas posteriores a la construcción de los embalses han erosionado el tramo de cauce comprendido entre el embalse de Flix y la incorporación del río Ciurana, perdiéndose las barras, y rectificando su trazado, dando inicio al proceso de acorazamiento del lecho. Además se aprecia un incremento significativo de la vegetación en el cauce como consecuencia de la falta de movilidad del sedimento.

Serra y otros (1990) estudiaron la evolución y las características sedimentarias del río Ebro entre Tortosa y Amposta en el período de tiempo 1983-1988 detectando ya el acorazamiento del cauce próximo a la desembocadura.

El transporte de sedimentos aguas abajo de los embalses se ha reducido considerablemente. Palanques (1987) lo sitúa en torno a 0.15 Mt/año en la desembocadura, en el período 1983-86. Guillén (1992) obtuvo en el período 1988-89, 0.12 Mt/año. Tena (2012) con mediciones de sonda de turbidez obtuvo una tasa de 0.166 Mt/año para el período 1998-2008, tasa que se reduce a 0.066 Mt/año para el período 2008-2012, según Tena y Batalla (2013). Hay algunos estudios que incluyen valores algo superiores, de manera que el tránsito sedimentario en el curso bajo del Ebro podría acotarse en la actualidad, de acuerdo con diferentes autores, en una horquilla que iría de 0,15 a 0,50 Mt/año.



4. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA

4.1. Introducción

En este apartado se incluyen los estudios realizados por el CEDEX para actualizar la estimación del volumen de sedimento retenido actualmente en 2020 en el embalse de Mequinenza, así como para caracterizar el tipo de sedimento existente.

La estimación del volumen de sedimentos en la actualidad en el embalse se ha realizado por dos procedimientos (extrapolando la tendencia de las tasas anuales de sedimentación obtenidas en la cola del embalse anteriores a 2012 y mediante una correlación del régimen hidrológico) y se ha calculado tanto el volumen total de sedimentos depositado en el embalse, como el acumulado en los 42 km de su cola. Previamente, se han estimado también los volúmenes de sedimentos acumulados en 1982 y en 2012 y se ha reevaluado la capacidad inicial del embalse en el momento de su puesta en servicio.

Para ello se ha utilizado la información topográfica y batimétrica que se detalla a continuación:

1. Salto de Mequinenza: Concesión aprovechamiento del río Ebro y afluente (Expediente CHE1957-A60).
2. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (1970) CEH (CEDEX).
3. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (1982) CEH (CEDEX).
4. Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza (2012) Control de Obras.

4.2. Reevaluación de la capacidad inicial del embalse de Mequinenza

Partiendo de las curvas de nivel vectorizadas (figura 8), se ha generado un Modelo Digital del Terreno (MDT), que ha permitido cubicar la capacidad del embalse hasta la cota 121.15 msnm. El resultado de esta cubicación indica que el volumen inicial del embalse era de 1483.29 hm³, frente a los 1530 hm³ teóricos. Las técnicas empleadas hoy en día, con Sistemas de Información Geográfica, permiten realizar estos cálculos con una precisión mucho mayor que hace 50 años, por lo que se empleará en este estudio como capacidad inicial de referencia 1483,29 hm³, que corresponde al momento de puesta en servicio del embalse en 1966. En este estudio se toma esta fecha como punto de partida de los procesos de sedimentación del embalse y esta geometría de referencia para el cálculo de la sedimentación en los diferentes escenarios temporales.

Para facilitar el análisis y comparación de las diferentes batimetrías, se ha calculado el volumen de embalse por tramos, según la sectorización empleada por el CEDEX para su cubicación en 1971 (figura 2), agrupados en 51 tramos. El tramo 16 corresponde a una rama lateral del vaso y se ha agrupado para este análisis con el tramo 15. En la Nota Técnica de mayo de 2020 se incluye el detalle de la cubicación



obtenida en cada tramo, que servirá para analizar la sedimentación de forma espacialmente distribuida.

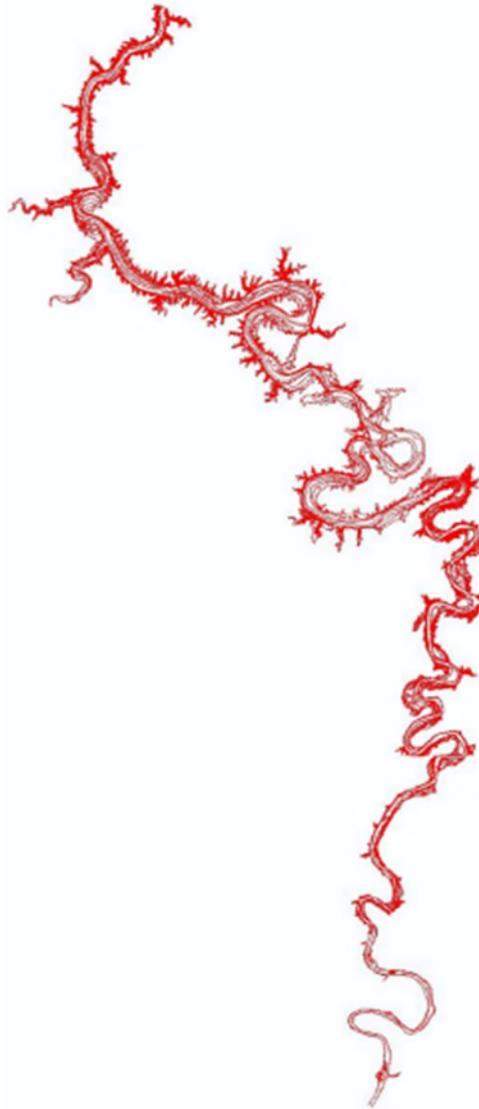


Figura 8. Batimetría original del embalse de Mequinenza en situación de puesta en explotación en 1966.

4.3. Estimación del volumen de sedimento acumulado hasta 1982

A partir de la cubicación por tramos resultante de las batimetrías del CEDEX de 1970 y 1982 incluida en la Nota Técnica de mayo de 2020 se compara en la figura 9 la capacidad de embalse acumulada con origen en la presa en los tres escenarios temporales: 1966 que corresponde a la situación inicial, 1970 y 1982, tras 4 y 16 años respectivamente desde la puesta en explotación.

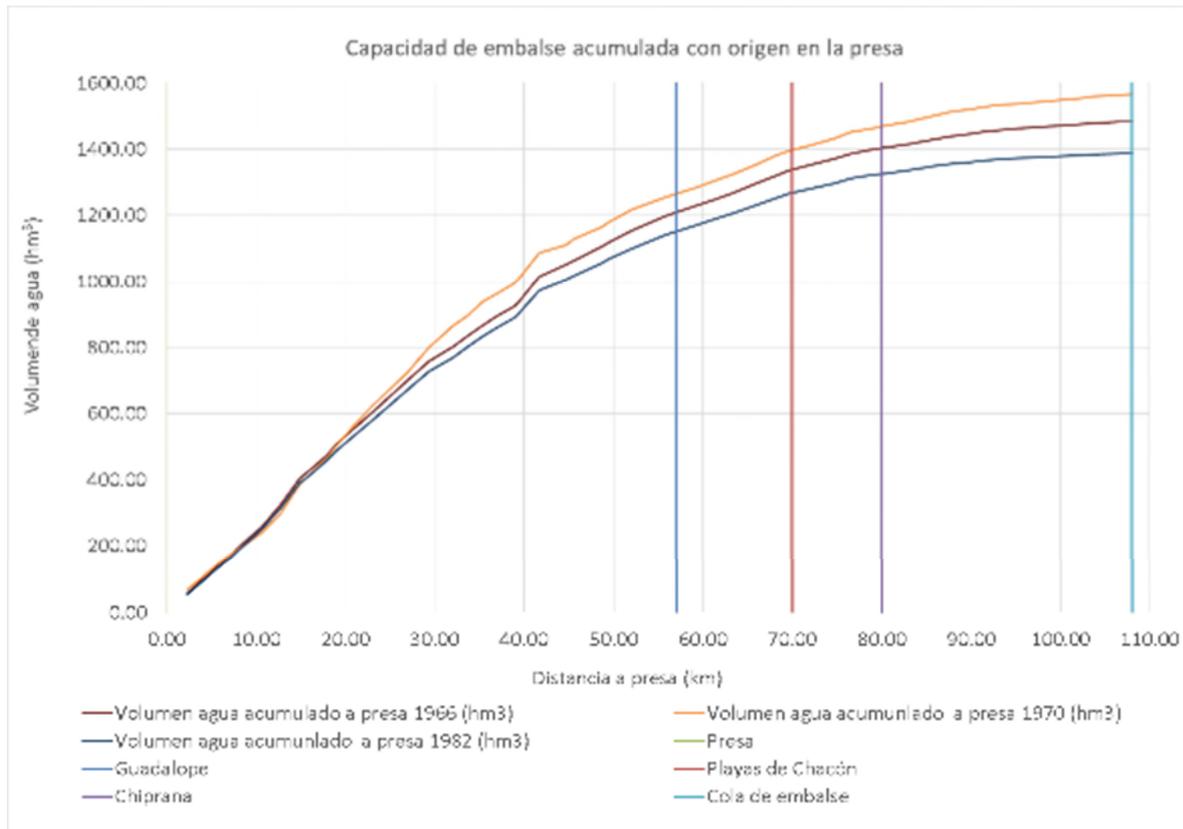


Figura 9. Capacidad de embalse acumulada con origen en la presa en 1966, 1970, y 1982

La batimetría de 1970 proporciona una capacidad de embalse de 1565.91 hm³, 82.62 hm³ superior a la inicialmente estimada, a partir de la topografía de 1961, en 1483.29 hm³. Esta discrepancia de un 5.6%, está asociada, por un lado, a la precisión de los medios técnicos disponibles cuando se realizaron tales trabajos y por otro, a la metodología empleada para el cálculo de los volúmenes. En el reconocimiento batimétrico de 1970 se obtuvieron perfiles transversales, cubicando los volúmenes por tramos, lo que puede introducir un error bastante grande en un embalse de 108 km de largo con una geometría tan compleja.

Con los datos de los valores de sedimento retenido en 1982 en cada uno de los tramos de embalse (partiendo de la topografía de 1961 y de la batimetría de 1970) incluidos en la Nota Técnica de mayo de 2020 se han elaborado las figuras 10 y 11 en las que se incluyen las referencias de la presa en el PK 0, de la incorporación del Guadalope PK 57, Playas de Chacón PK 70, Chiprana PK 80 y la cola del embalse en el azud del Monasterio de Rueda.

Los valores de sedimentación obtenidos a partir del reconocimiento batimétrico de 1970 de la figura 10 presentan una gran dispersión de los valores de la sedimentación, proporcionando tramos con grandes volúmenes de erosión y sedimentación difícilmente explicables, si no es por la falta de precisión en los perfiles obtenidos en el reconocimiento.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

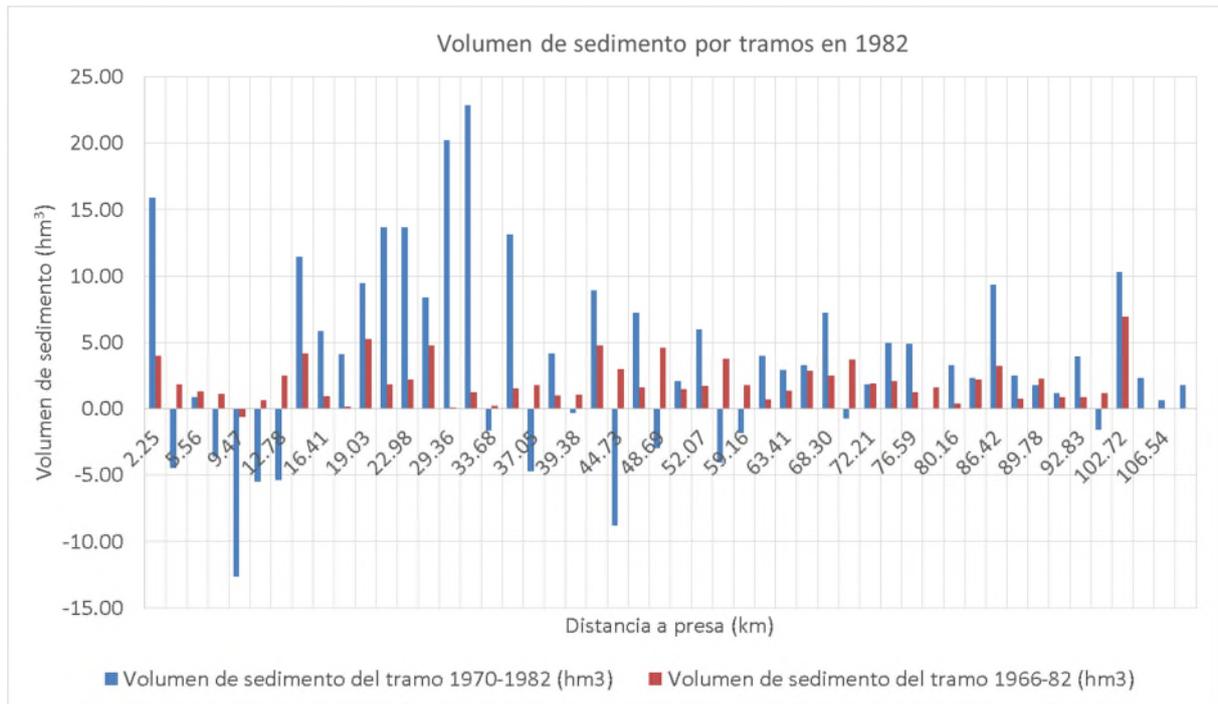


Figura 10. Volumen de sedimento por tramos (1982)

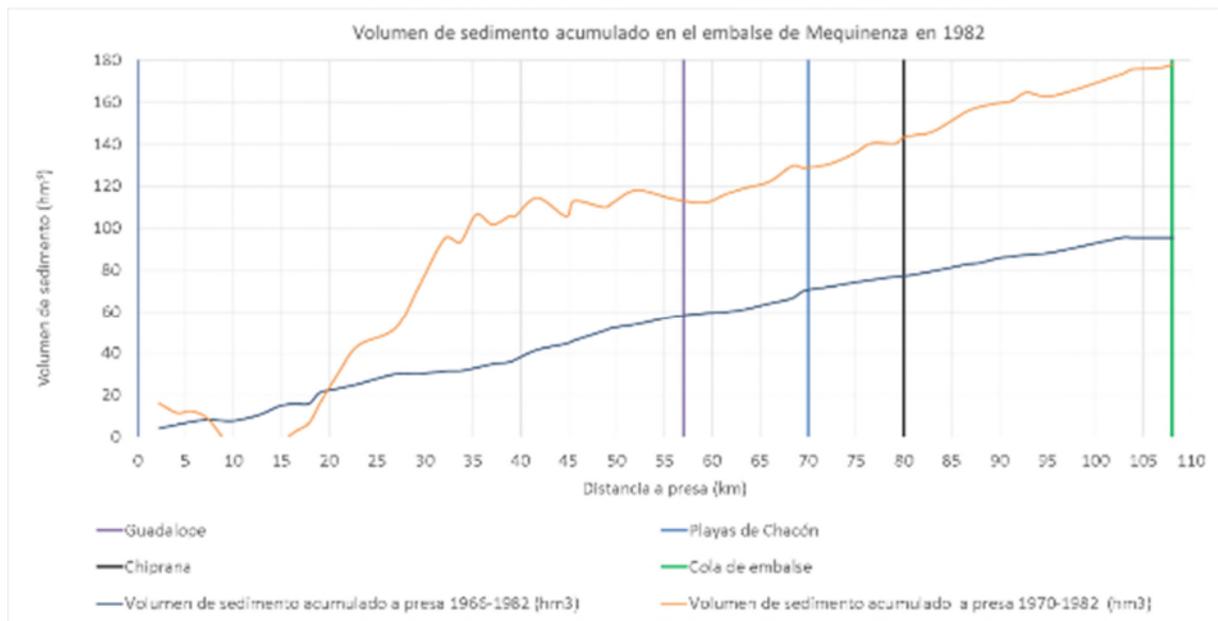


Figura 11. Volumen de sedimento acumulado con origen en la presa de Mequinenza (1982)

El volumen de sedimento con la batimetría de 1982 referido a la topografía de 1961, proporciona un volumen de sedimento de 95 hm³, lo que se corresponde con la valoración de sedimento que se obtuvo en el estudio de 1982. Sin embargo, este valor se duplica con la batimetría de 1970.

Por todas estas razones, se ha decidido no emplear en el presente estudio el reconocimiento batimétrico de 1970. Asimismo, se concluye que la calidad técnica de la metodología empleada para el reconocimiento batimétrico del CEDEX de 1982, como la de la cartografía digital generada, permiten considerar adecuado el valor 95 hm³ de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza en 1982.



4.4. Estimación del volumen de sedimento acumulado hasta 2012

Además de las dos batimetrías completas del embalse, se dispone de la topografía parcial de la segunda mitad del embalse, en concreto desde la desembocadura del Guadaloque al Ebro obtenida en el estudio de Control de Obras de 2012 (apartado 2.7). Esta topografía pudo obtenerse por técnicas convencionales gracias a que en 2012 quedó emergido la cola del embalse por encima de la cota 100.5 msnm, por lo que se supone de gran precisión. Partiendo de las curvas de nivel vectorizadas de la figura 6, se han obtenido los volúmenes de agua hasta la cota 121.15 msnm desde el tramo 30 (PK 59) hasta la cola del embalse.

La figura 15 representa la capacidad acumulada, con origen en el tramo en los tres escenarios temporales. Por diferencia de la capacidad de cada tramo se ha calculado el volumen de sedimento acumulado en cada uno de ellos, en los intervalos temporales 1966-1982, 1982-2012 y 1966-2012. El resultado se muestra en la figura 16 (el detalle de los valores acumulados anuales puede verse en la Nota Técnica de mayo de 2020).

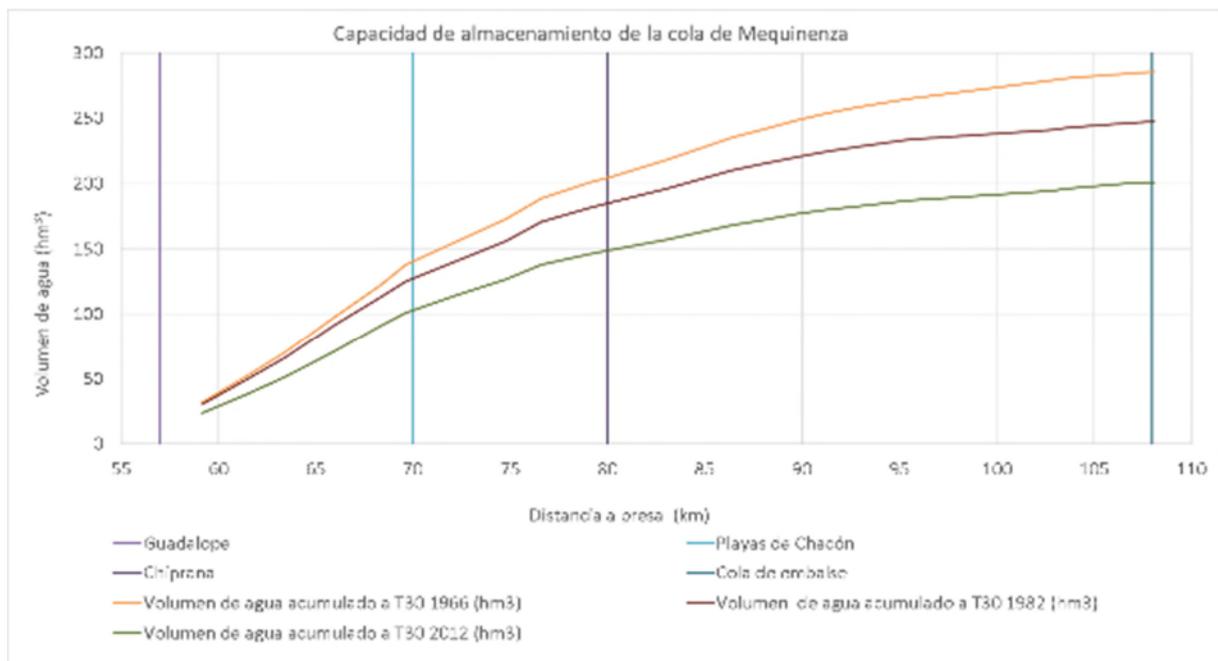


Figura 12. Evolución temporal de la capacidad de la cola del embalse de Mequinenza

Se aprecia que en los últimos 42 km de la cola del embalse se acumularon 37.92 hm³ de sedimento hasta 1982 y otros 46.28 hm³ desde 1982 hasta 2012, totalizando 84.21 hm³.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

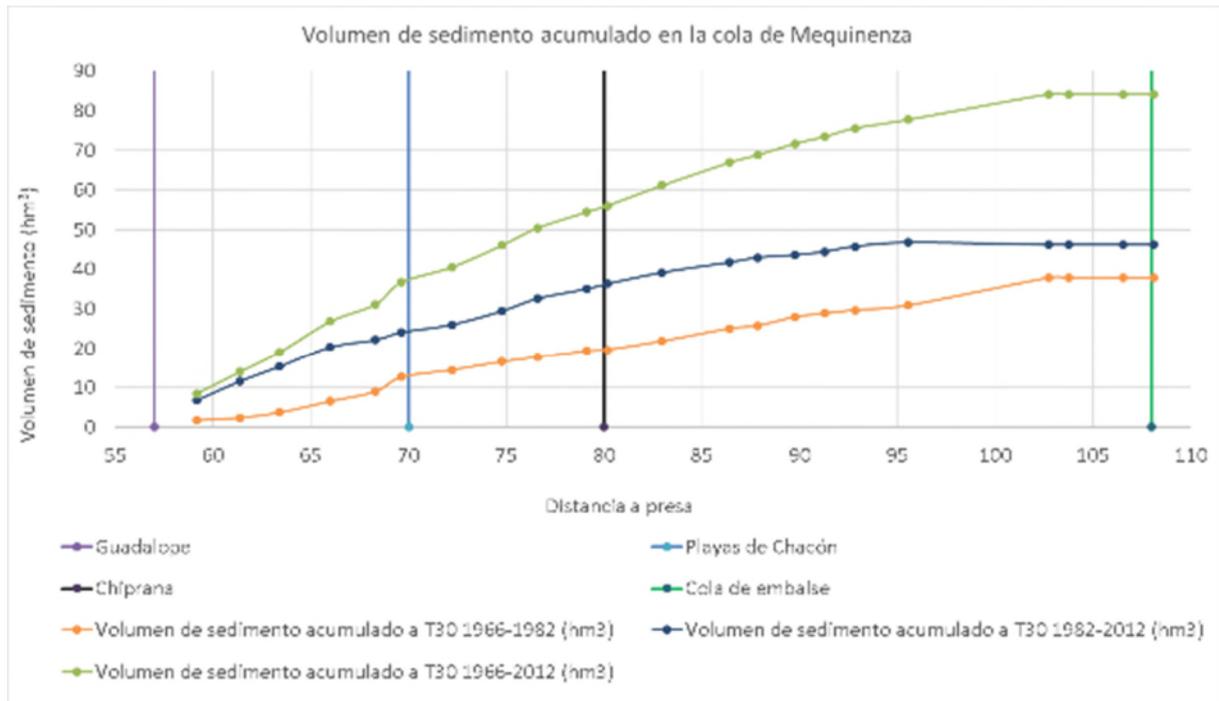


Figura 13. Sedimento acumulado en la cola del embalse de Mequinenza en diferentes períodos

Si se comparan estos resultados con los obtenidos en el estudio de Control de Obras de 2012, se aprecia que existe un desajuste en el volumen de sedimentos. En aquel estudio se estimó que el volumen total de sedimentos en el embalse era 76.8 hm³, con el reparto indicado en la figura 7. Se ha calculado el volumen de sedimento empleando esa misma discretización espacial, y se ha generado la figura 14 para facilitar la comparación.

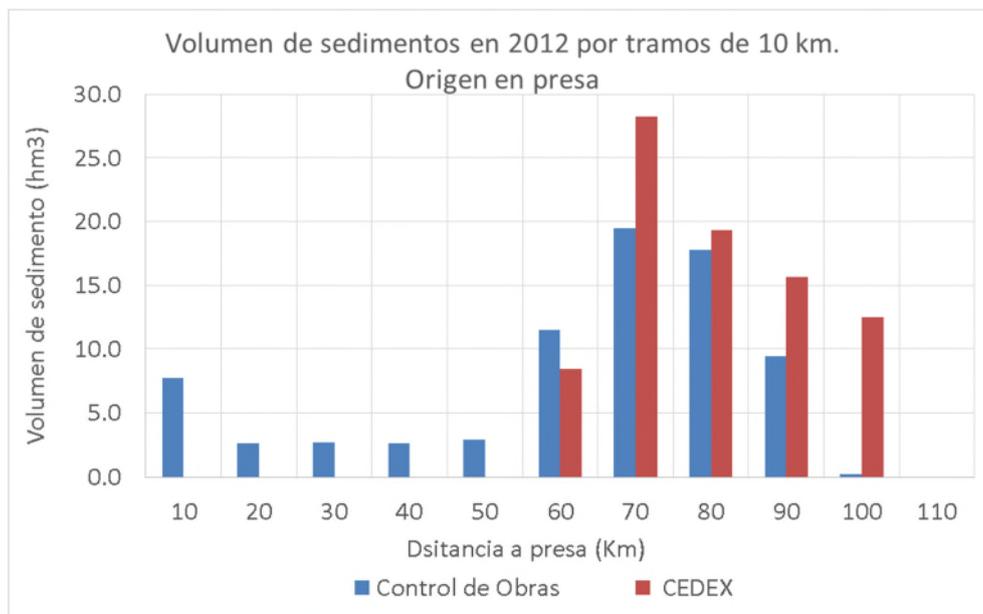


Figura 14. Comparación de la cubicación del sedimento en la cola del embalse de Mequinenza.

Teniendo en cuenta que para hacer estos cálculos se ha empleado la misma información cartográfica, el desfase debe explicarse por el método empleado para la cubicación. En el trabajo de Control de Obras se indica que el volumen del sedimento



de la cola se obtuvo por sustracción de los MDT generados a partir de las curvas de nivel obtenidas en 2012 y las vectorizadas de la topografía de 1961 (figuras 5 y 6). Es posible que un error en la georreferenciación de ambos MDT haya alterado el resultado real. En el actual estudio, para evitar que desajustes en la georreferenciación puedan afectar a los resultados, se han cubicado los volúmenes de agua hasta la cota 121.15 msnm, con ambos MDT y el volumen de sedimento se obtiene por la diferencia de capacidades. Esta operación se ha realizado de forma global en la cola y por tramos proporcionando resultados consistentes por ambos métodos. Por tanto, se considera más adecuada la estimación de 84.21 hm³ de sedimento almacenados en los últimos 42 km de embalse en 2012.

De acuerdo con estos resultados la tasa de sedimentación anual media en la cola del embalse del período 1966-1982 fue de 2.37 hm³/año, mientras que el segundo período (1982-2012) desciende a 1.54 (65.08%), lo que pone de manifiesto una reducción en la aportación de sedimento que llega al embalse.

Si la forma de explotación del embalse se mantiene en el tiempo, se puede suponer que los procesos hidrodinámicos y fisicoquímicos que afectan a la sedimentación en el embalse no se verán alterados, y por tanto si se produce una modificación de la tasa de aportes de sedimentos al embalse, es razonable suponer que esta variación afectará de forma lineal a la tasa de sedimentación de cada uno de los tramos en los que se ha dividido.

En la Nota Técnica de mayo de 2020 se calculan las tasas de sedimentación anual de cada uno de los tramos del embalse en el período 1966-1982 y las de los tramos de cola en el lapso 1982-2012. Aplicando la reducción observada de la tasa de sedimentación obtenida para el tramo de cola al resto de tramos, se obtiene una aproximación de la tasa de sedimentación de los primeros tramos del embalse sin batimetría en el período 1982-2012. Con estas tasas se obtuvo una estimación del sedimento en todo el embalse en 2012.

Como resultado de estos cálculos se desprende que durante el período de 1982 a 2012, se depositaron en la cola del embalse de Mequinenza 42.28 hm³, y otros 73.97 hm³ en el resto del embalse, totalizando 116.25 hm³ en todo el período. Si acumulamos estos sedimentos a los 95 hm³ del período anterior a 1982, totalizan 211.87 hm³.

La figura 15 muestra la evolución temporal del sedimento en el embalse, acumulados con el origen en la presa, en 1982 y 2012.

Repartiendo linealmente el volumen de sedimentos en ambos períodos se obtiene que de 1966 a 1982 la aportación anual de sedimentos al embalse fue de 5.93 hm³/año, que con una densidad media del sedimento de 1126.36 kg/m³, resulta 6.68 Mt/año. Esta aportación media se reduce en el segundo período a 3.88 hm³/año, unos 4.37 Mt/año. Lógicamente estos valores son promediados y vendrán asociados los procesos de avenida ocurridos en ese período de tiempo. La tabla 1 muestra la clasificación de los caudales de entrada en Mequinenza en ambos períodos. La tabla indica el número de ocasiones en que se han producido avenidas con puntas dentro de los intervalos de caudal indicados. Se aprecia que en el segundo intervalo las



avenidas han sido menos frecuentes, como consecuencia de la mayor regulación de la cuenca, lo que justifica el descenso de aportes de sedimentos registrados.

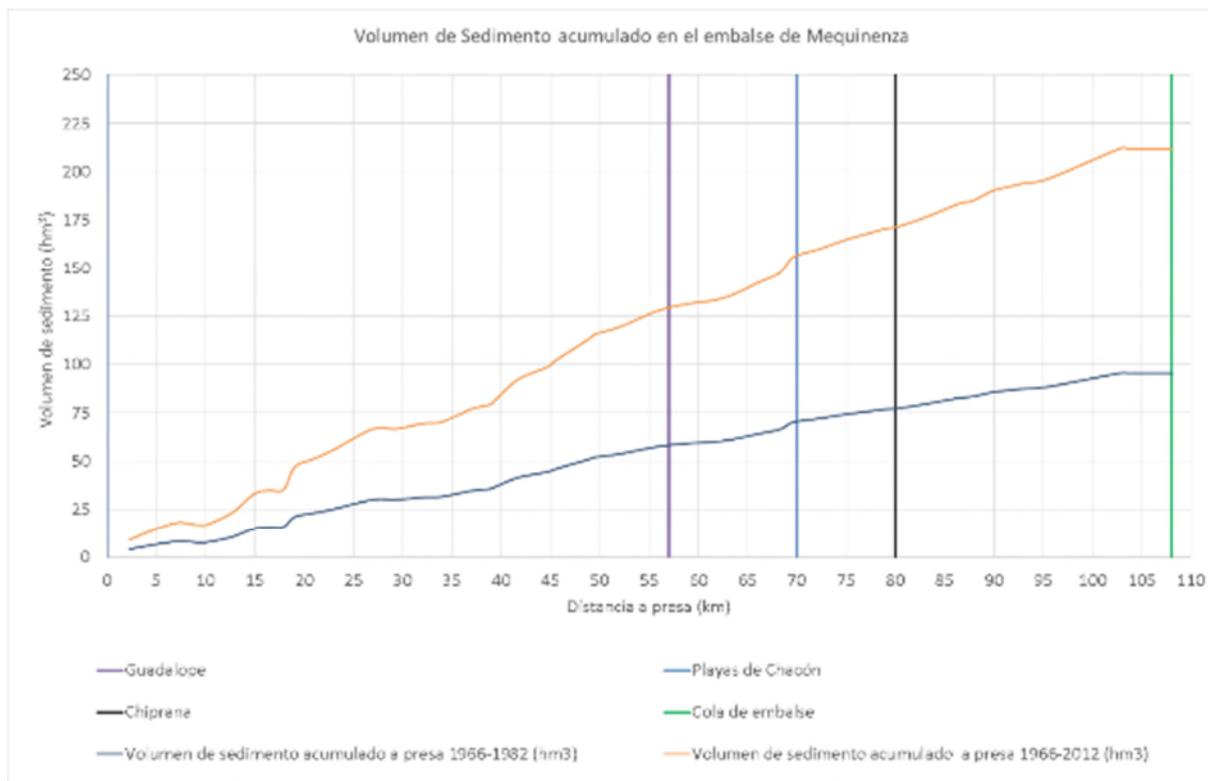


Figura 15. Evolución sedimentológica del embalse de Mequinenza en 1982 y 2012

Tabla 1. Clasificación de caudales por períodos

Caudal (m³/s)	Caudales de entrada en Mequinenza	
	1966-1982	1983-2012
500-1000	285	222
1000-1500	52	51
1500-2000	28	14
2000-2500	4	1
2500-3000	2	0

4.5. Estimación del volumen de sedimento acumulado en 2020 por ajuste de la tasa de sedimentación

Teniendo en cuenta que el régimen hidrológico de la cuenca no se ha visto alterado desde 2012 hasta la actualidad, parece adecuado emplear las mismas tasas de sedimentación del periodo anterior. En la Nota Técnica de mayo de 2020 pueden consultarse los cálculos de los volúmenes almacenados por tramos y acumulados a lo largo del embalse empleando la misma tasa de sedimentación, totalizando 242.92 hm³. La figura 16 muestra la evolución sedimentológica del embalse en los tres hitos temporales considerados, 1982, 2012 y 2020.

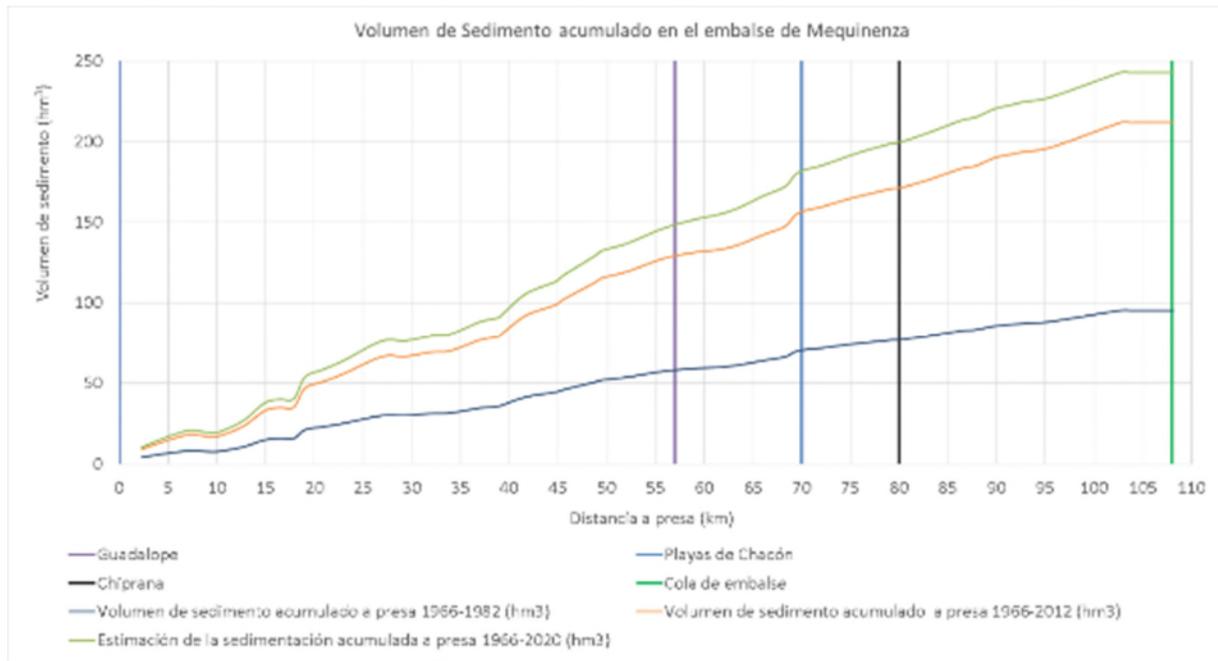


Figura 16. Evolución temporal de la sedimentación del embalse de Mequinenza. Valores acumulados con origen en la presa

4.6. Estimación del volumen de sedimento acumulado en 2020 por ajustes hidrológicos

El anuario de aforos del CEDEX dispone de la serie de caudales diarios en la estación de Sástago, de código Indroea 9112, con datos desde 1945 hasta 1997. Para poder disponer de una serie completa desde 1966 hasta la actualidad, los técnicos de la CHE han generado una serie de caudales, partiendo de la serie de caudales desaguados y del nivel de embalse, esto ha permitido completar esta parte del estudio.

La figura 17 muestra la serie de caudales medios diarios desde 1966 hasta la actualidad. Tal y como se comentó anteriormente, se aprecia un descenso de los caudales punta en avenidas. La pendiente de la línea correspondiente al ajuste lineal presenta una pendiente negativa de 6.2 l/s/día.

El caudal medio de la serie desde 1966, hasta la actualidad, es de 21.1 hm³/día. Las figuras 18 y 19 presentan la aportación en acumulada en hm³, referida al caudal medio. Se aprecia un cambio de pendiente de la ley de aportaciones acumuladas en torno a 1982, precisamente. El caudal medio de aportación del período 1966-1982 fue de 27.2 hm³/día (figura 18), mientras que en el período 1985-2020 es de 17.7 hm³/día (figura 19). Este cambio puede deberse a cambios de los usos del suelo, a una mayor regulación de la cuenca, o incluso a fenómenos de cambio climático. En cualquier caso, el análisis de las causas excede el ámbito de este estudio.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

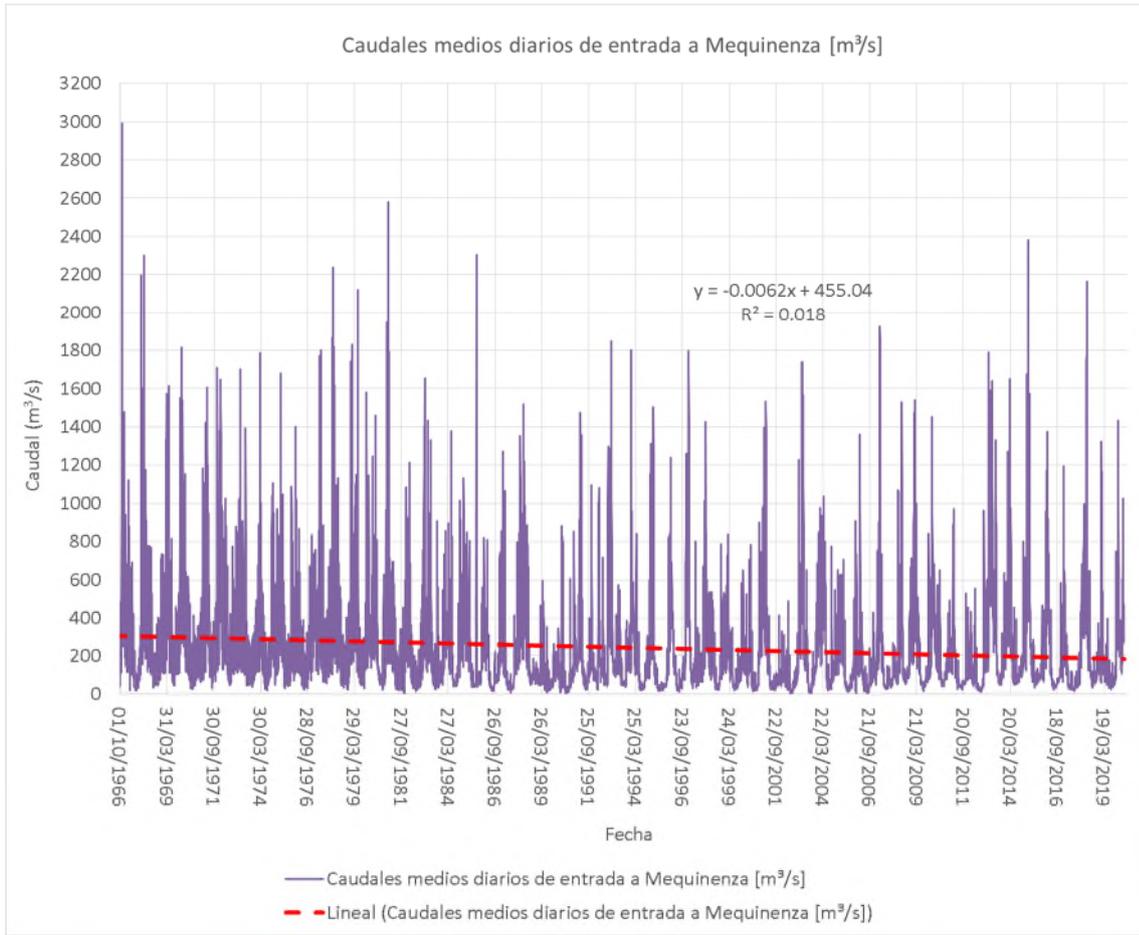


Figura 17. Serie histórica de cadules de entrada en el embalse de Mequinenza

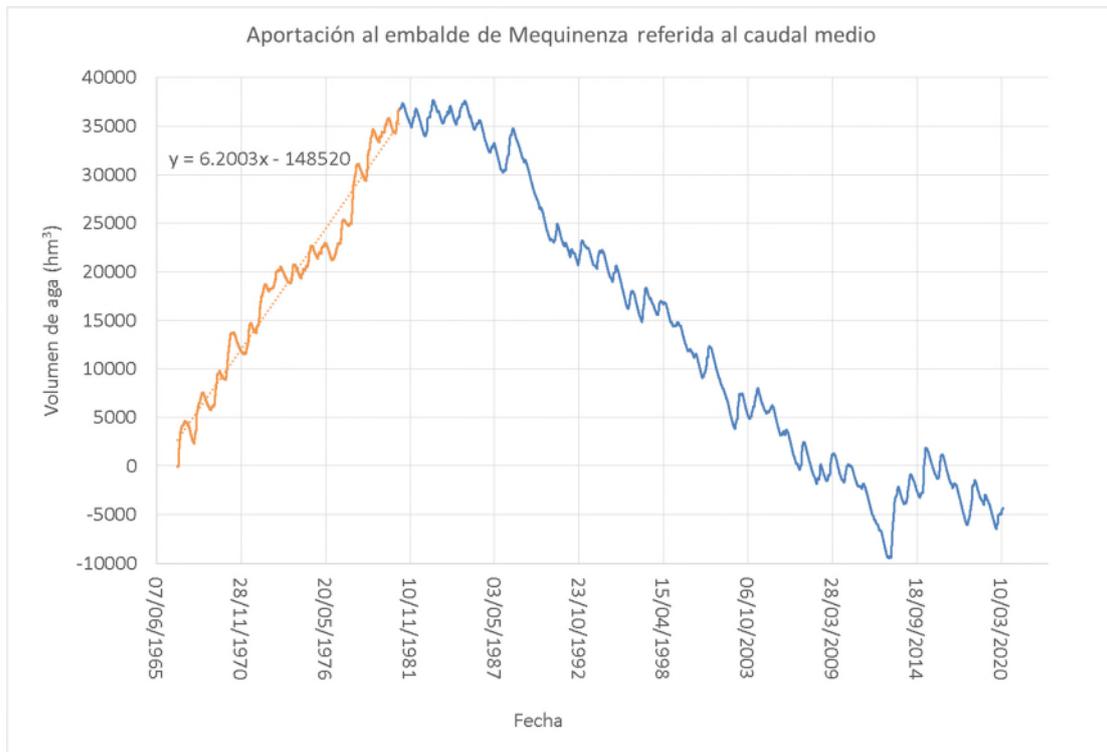


Figura 18. Aportación acumulada referida al caudal medio (1967-2020). Ajuste del caudal medio del período 1967-1982



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

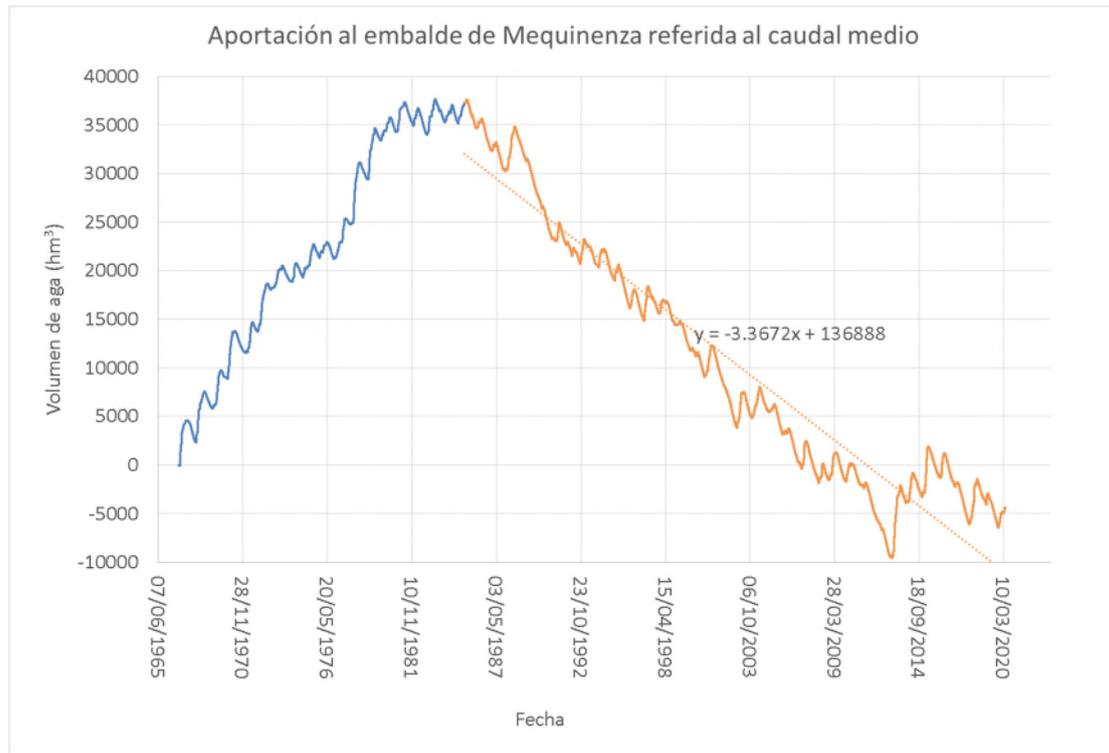


Figura 19. Aportación acumulada referida al caudal medio (1967-2020). Ajuste del caudal medio del período 1985-2020.

Considerando que este embalse retiene la totalidad de sedimento aportado, bien sea por arrastre de fondo o en suspensión, se puede obtener una relación entre caudal líquido y caudal sólido que proporciona un volumen determinado de sedimento aportado al embalse. Tomando como fecha de inicio de las aportaciones, el 01/10/1966, con una relación:

$$\frac{Q_{sólido}}{Q_{líquido}} = 0.6 \cdot 10^{-3}$$

se obtiene un volumen de sedimento acumulado aportado al embalse de 94.5 hm³ el 01/10/1982. Con esta relación se obtiene que el volumen 207.2 hm³ de sedimento en el 01/10/2012 y de 244.9 hm³ el 14/04/2020, valores que concuerdan con los obtenidos con la otra metodología descrita en los apartados anteriores, como se aprecia en la figura 23. Puesto que todo el volumen de sedimento que llega al embalse queda retenido, se ha comprobado que existe una relación lineal entre la aportación de agua y la de sedimento.

Es conveniente aclarar en este punto que aunque aquí se ha obtenido un coeficiente medio que reproduce correctamente el balance sedimentológico del embalse, este valor no es constante, siendo mayor durante los episodios de avenida que con caudales más bajos. Sin embargo, a los efectos de este estudio, esta aproximación resulta adecuada.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

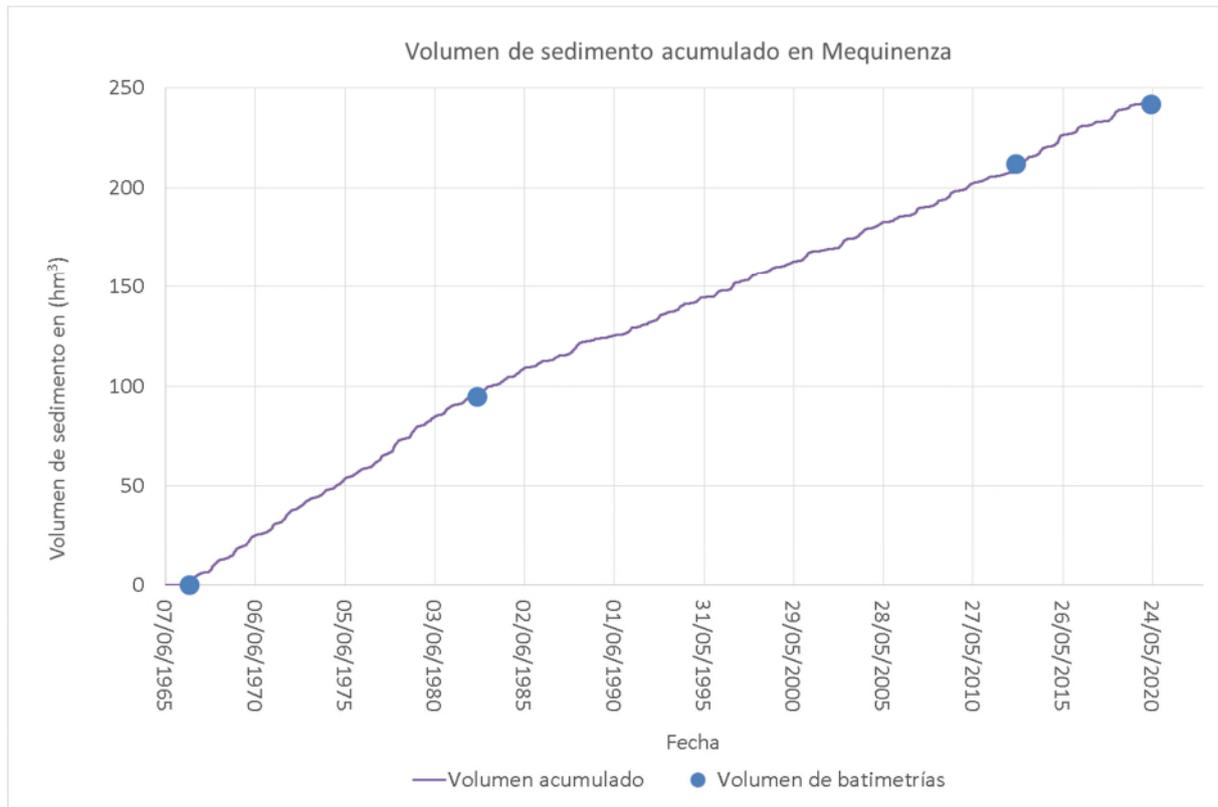


Figura 20. Evolución del volumen de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza

Si se calcula el volumen medio diario de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza de la serie histórica desde su puesta en explotación, se obtiene un valor de $12524 \text{ m}^3/\text{día}$. Si se refiere la serie de sedimentación acumulada al caudal medio se pone de manifiesto el cambio de tendencia de aportaciones que se había descrito anteriormente, y que se muestra en la figuras 21 y 22. Las tasa anual media en el período 1966 a 1982 resulta de $5.99 \text{ hm}^3/\text{año}$ ó 6.75 Mt/año , y en el segundo período resulta de $3.87 \text{ hm}^3/\text{año}$ ó 4.36 Mt/año , un 64,6% de la inicial.

En el estudio inédito del CEDEX (2002) se estimaba el aporte de sedimentos en Mequinenza en $6,86 \text{ Mt/año}$, valor muy ajustado al calculado en este estudio para el período 1966-1986.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

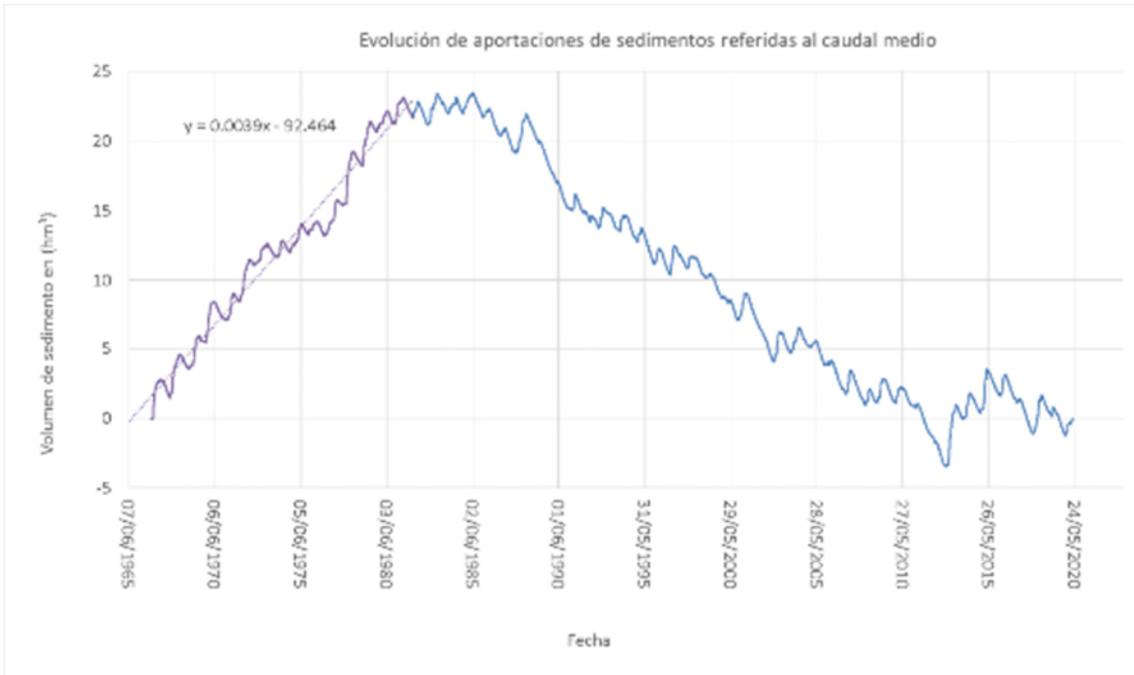


Figura 21. Evolución del volumen de sedimento acumulado referido al caudal medio del embalse de Mequinenza. Ajuste del caudal medio del tramo 1966-1982

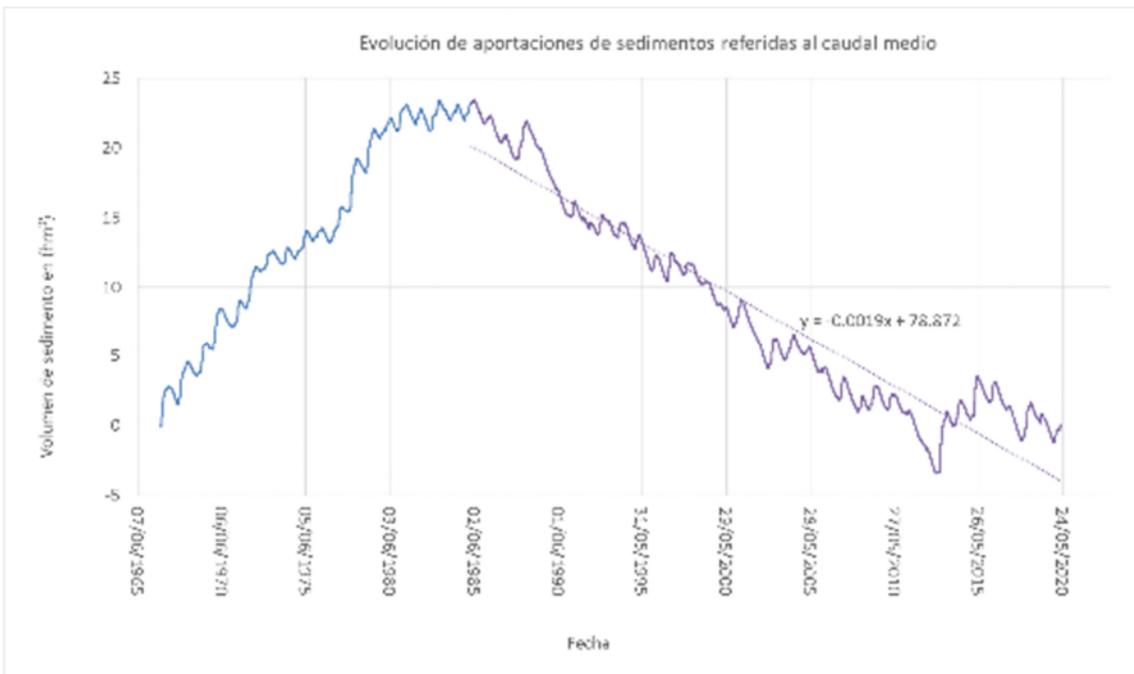


Figura 22. Evolución del volumen de sedimento acumulado referido al caudal medio del embalse de Mequinenza. Ajuste del caudal medio del tramo 1985-2020

4.7. Caracterización del sedimento de la cola del embalse de Mequinenza

En este apartado se analiza con más detalle el sedimento localizado en la cola del embalse. La figura 23 muestra el volumen de sedimento entre los tramos 30 y 51, correspondientes a los últimos 42 km del embalse, en los tres intervalos temporales



considerados. Se aprecia en esta figura que en el entorno de Chiprana (PK 80), se localiza una zona de menor depósito. Esto proporciona una explicación al análisis realizado por Control de Obras en el que se indica la pequeña variación de sedimentación observada entre el sondeo realizado para el proyecto del puente y el realizado en 2011. En el estudio de Control de Obras se concluía que la sedimentación se había producido en un primer momento de llenado del embalse, pero se aprecia que en esta zona existe menor sedimentación que en los tramos colindantes.

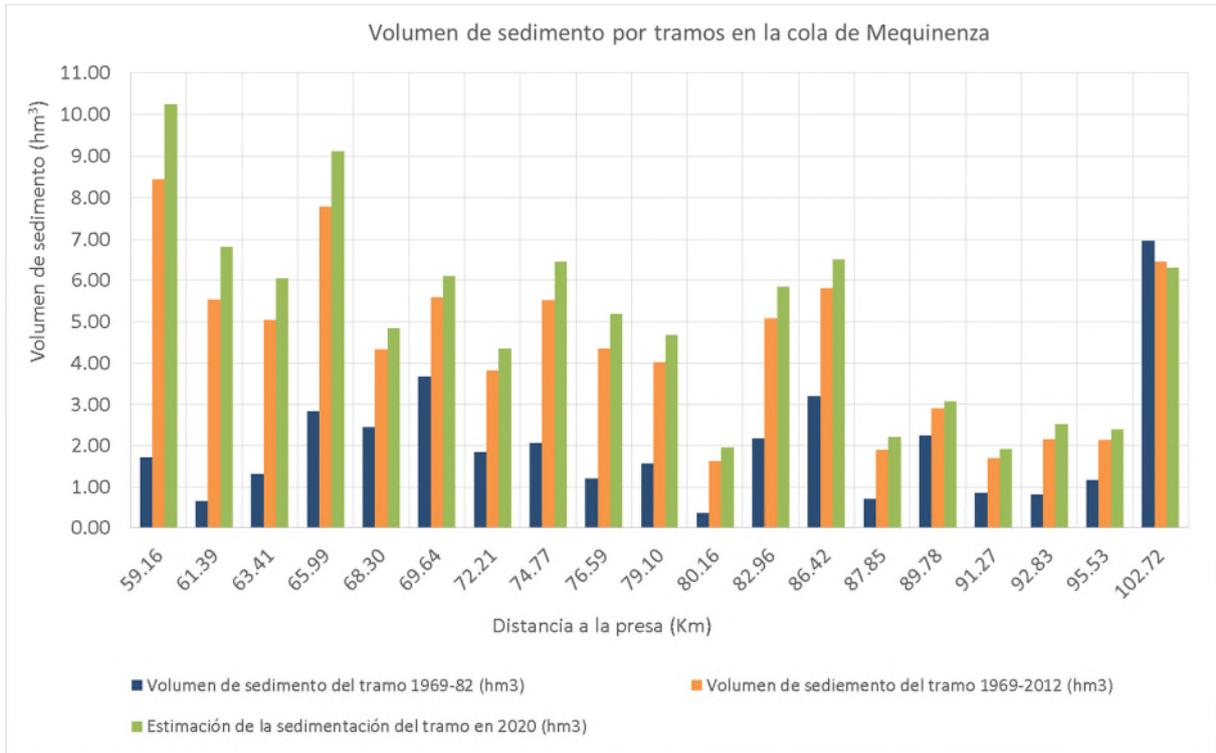


Figura 23. Volumen de sedimento por tramos en 1982, 2012 y 2020.

La figura 24 presenta estos valores de sedimentación acumulados con origen en el tramo 30, en torno a la desembocadura del Guadalope. Se aprecia que el volumen de sedimento acumulado en este tramo hasta 1982 fue de 37.92 hm³, este valor asciende a 84.21 hm³ en 2012. En la actualidad se estima que existen en este tramo un total de 96.55 hm³.

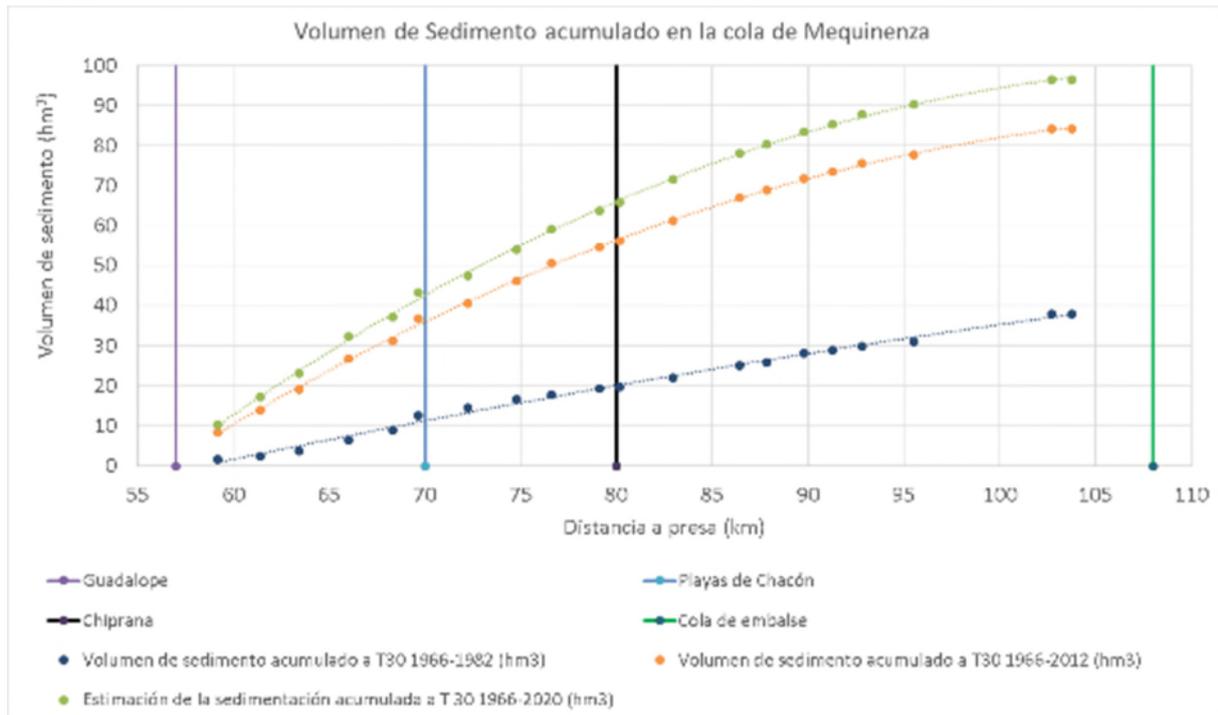


Figura 24. Evolución sedimentológica del embalse de Mequinenza

Para la caracterización del sedimento, partiendo de la naturaleza de las columnas estratigráficas obtenidas en los sondeos realizados en el año 2012 para la caracterización del sedimento en la cola del embalse de Mequinenza (ver apartados 2.6 y 2.7) se han calculado los porcentajes de cada tipo de sedimento encontrado concluyendo (ver el detalle de los estudios en la Nota Técnica de mayo de 2020) que de los 40.2 hm³ de sedimento que se estima que existen entre los PK 72 a 90, 10.67 hm³ serían de arena y 3.73 hm³ de grava.

4.8. Resumen

Como resumen de los trabajos realizados en este apartado para la caracterización del sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza pueden establecerse los siguientes valores:

Capacidad del embalse de Mequinenza:

- Capacidad inicial del embalse de Mequinenza (1966) estimada en este informe: 1483,29 hm³
- Capacidad teórica del embalse de Mequinenza (1966) en su puesta en servicio: 1530 hm³

Volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mequinenza:

- Volumen de sedimentos acumulados en Mequinenza en 1982 calculados en este informe en dicha fecha a partir de la batimetría de 1982 y la topografía de 1961: 95 hm³



- Volumen de sedimentos acumulados en Mequinenza en 2012 estimados en este informe: 211 hm³ (determinado a partir de la tendencia de las tasas de sedimentos en la cola del embalse calculadas en este estudio con la información disponible: 6,68 M/año en el periodo de 1966 a 1982 y 4,37 Mt/año entre 1982 y 2012)
- Volumen de sedimentos acumulados en Mequinenza en 2020 estimados en este informe: entre 242 hm³ (calculado con las mismas tasas de aportación de sedimentos de antes) y 245 hm³ (calculado mediante un ajuste hidrológico)

Caracterización de los sedimentos acumulados en el tramo de cola del embalse de Mequinenza:

- Volumen de sedimentos acumulados en los 42 km de cola del embalse de Mequinenza calculado en este informe: 38 hm³ (1982) y 84 hm³ (2012).
- Volumen de sedimentos acumulados en los 42 km de cola del embalse de Mequinenza estimados en este informe en 2020: 97 hm³.
- Caracterización del sedimento en la cola del embalse. En el presente informe se calcula que de los 40 hm³ de sedimento que se estima que existen entre los PK 72 a 90, 11 hm³ serían de arena y 4 hm³ de grava.



5. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE RIBARROJA

En este apartado se incluyen los estudios realizados por el CEDEX para actualizar los cálculos del volumen de sedimento retenido actualmente en 2020, en el embalse de Ribarroja.

Para este análisis se ha partido del estudio batimétrico realizado por el grupo Grupo Flumen en 2007, que acotaba los depósitos sedimentarios en el embalse de Ribarroja entre 13 y 16.6 hm³. No ha sido posible recopilar la información batimétrica digital para realizar un análisis semejante al de Mequinenza que permitiera obtener las tasas de sedimentación por tramos a lo largo del embalse. Sin embargo, esta información es suficiente para estimar la tasa de sedimentación global del embalse, la cual se calculó en la Nota Técnica de mayo de 2020 mediante una correlación del régimen hidrológico, de manera similar a como se hizo en el apartado 3.5 para el embalse de Mequinenza

La serie de caudales diarios de entrada al embalse de Ribarroja se ha obtenido del anuario de aforos del CEDEX, como combinación de los registros de las estaciones 9017 en río Cinca en Fraga y la 9025 en el río Segre en Seros, para el período 1967 hasta 2016. En primer lugar se han completado las series de caudales, conservando el valor medio de la relación de los caudales de los ríos Cinca y Segre. La serie de caudales de entrada al Embalse de Ribarroja se presenta en la figura 28. Se aprecia, que como en el caso del río Ebro, el ajuste lineal de la serie de caudales presenta una pendiente decreciente de 6.8 l/s/día. Este valor es semejante a la reducción de caudal observada en el Ebro de 6.2 l/s/día (apartado 3.6).

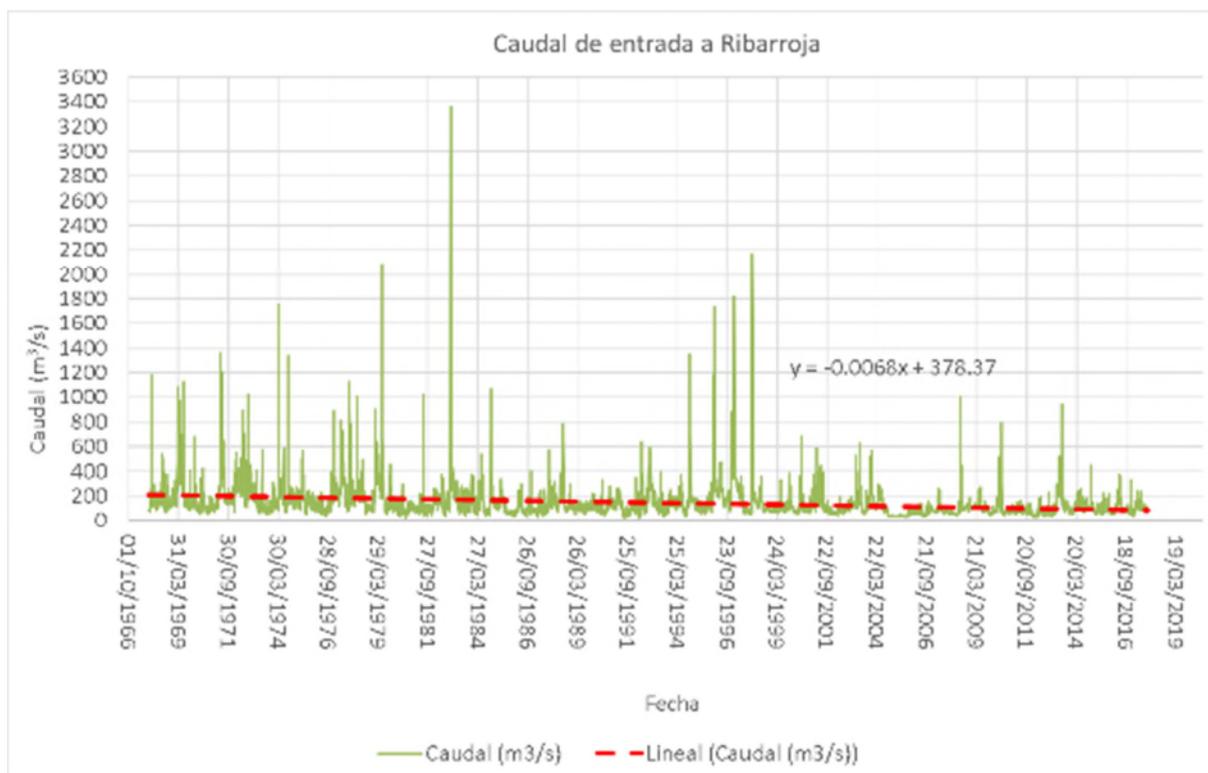


Figura 25. Serie histórica de caudales de entrada al embalse de Ribarroja



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

El caudal medio de la serie histórica es de 12.69 hm³/día. La figuras 26 y 27 muestran la aportación aculada al embalse de Ribarroja, referida al caudal medio. Se aprecia, como en el caso del Ebro, un cambio de tendencia en la evolución de las aportaciones, aunque en este caso se aprecia una “meseta” más amplia durante las décadas de los años 80 y 90. El caudal medio del período 1967-1980 era 17.71 hm³/día, mientras que en el período 2004-2016 es de 8.25 hm³/día.

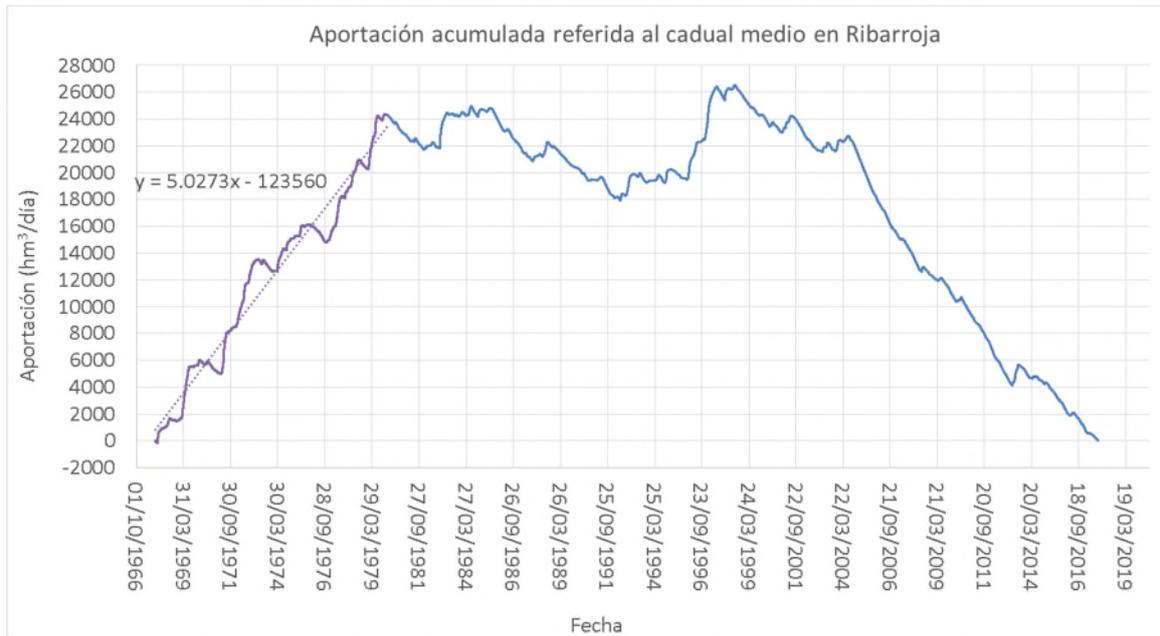


Figura 26. Aportaciones acumuladas referidas al caudal medio del embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal medio del tramo 1967-1980



Figura 27. Aportaciones acumuladas referidas al caudal medio del embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal medio del tramo 2004-2016

Con estos datos se ha calculado la relación de caudal líquido y sólido que proporciona una sedimentación acumulada en octubre de 2007, acotada entre 13 y 16.6 hm³:



$$0.65 \cdot 10^{-4} < \frac{Q_{sólido}}{Q_{líquido}} < 0.832 \cdot 10^{-4}$$

La figura 28 muestra la horquilla de variación de la sedimentación del embalse. De acuerdo con estos valores, a fecha de octubre de 2016 la sedimentación en Ribarroja está acotada entre 15 y 19.3 hm³.

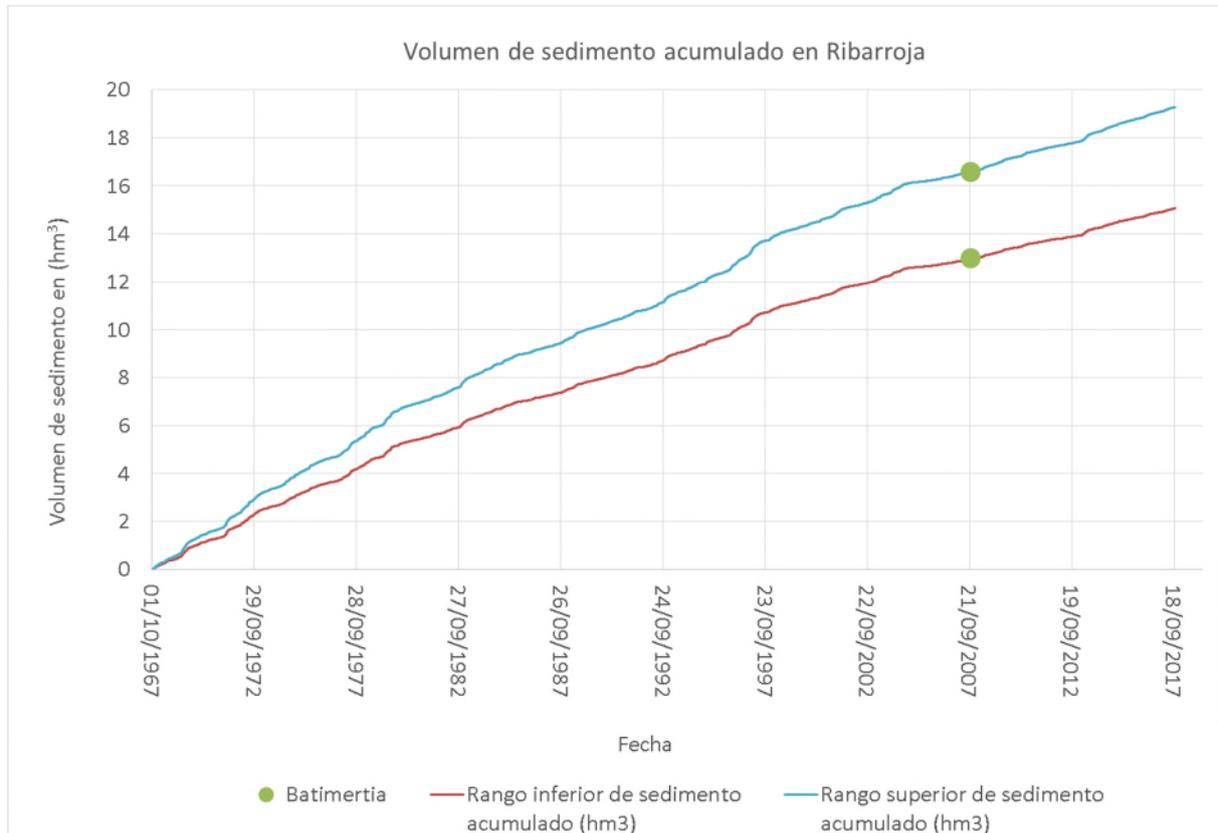


Figura 28. Rango de sedimentación acumulada en el embalse de Ribarroja

Partiendo del valor del rango medio de sedimentación, se ha obtenido la evolución de la sedimentación del embalse referida al caudal medio de sedimentación. Este caudal es de 940 m³/día. La figura 29 muestra el ajuste del caudal de sedimentación de los primeros años de explotación (1967-1980), que resultó de 1340 m³/día. La figura 30 corresponde al ajuste de los últimos años (2004-2016). El ritmo de sedimentación de este último período es de 640 m³/día. De acuerdo con esto, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0.55 Mt/año, valor que desciende prácticamente a mitad, 0.26 Mt/año en el período 2004-2016.

Por tanto, considerando un porcentaje de retención de sedimento del 40 % (Flumen, 2009) en la entrada se Ribarroja el aporte de sedimento fue de 1.35 Mt/año, valor que coincide con el estudio inédito del CEDEX (2002).



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

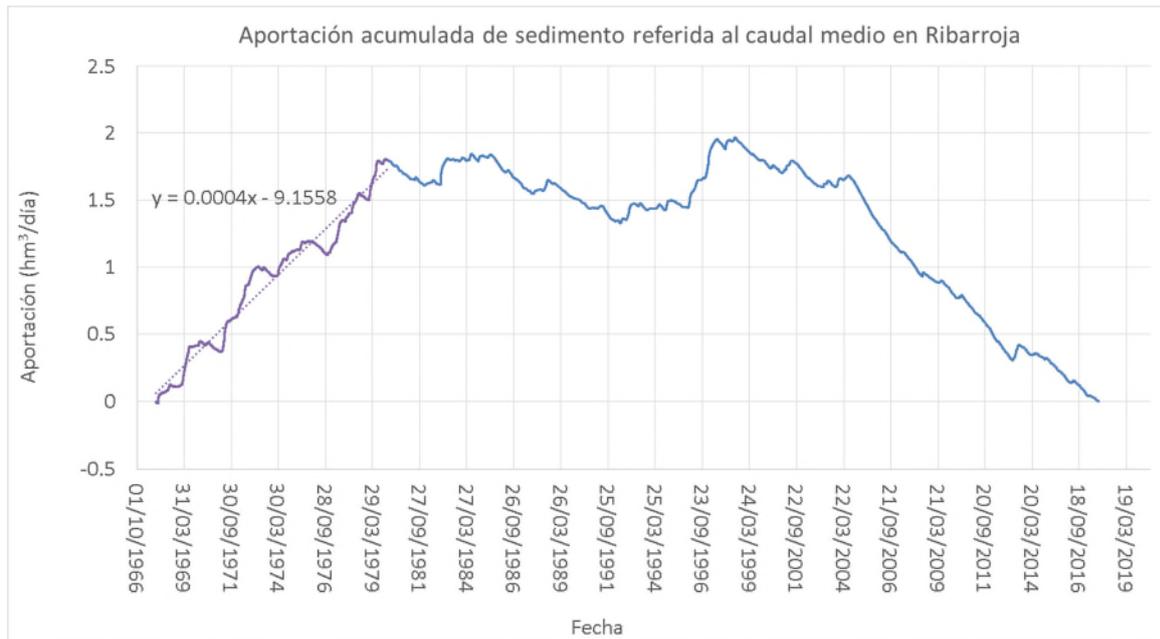


Figura 29. Rango medio de sedimentación acumulada referida al caudal medio en el embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal del tramo 1967-1980

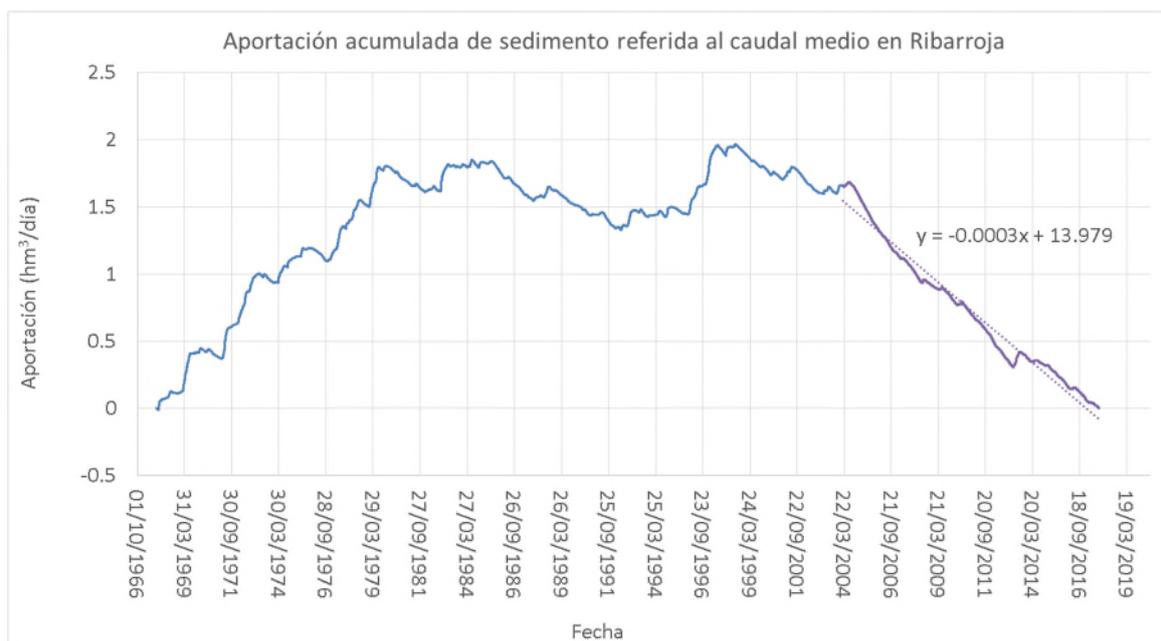


Figura 30. Rango medio de sedimentación acumulada referida al caudal medio en el embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal del tramo 2004-2016



6. INFLUENCIA DE LOS EMBALSES DE MEQUINENZA Y RIBARROJA EN LA DINÁMICA SEDIMENTARIA DEL CURSO BAJO DEL RIO EBRO

En los apartados anteriores se ha analizado el transporte de sedimento aguas arriba de los embalses de Mequinenza y de Ribarroja. En el presente apartado va a realizarse una estimación de la evolución del tránsito sedimentario en el curso bajo del río Ebro desde 1967 hasta la actualidad, analizando la influencia que ha tenido la construcción de los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Para ello, se realizará en primer lugar una estimación del transporte de sedimentos que se tendría en la actualidad en la hipótesis de que no existieran estos embalses, seguida de un segundo análisis estudiando la situación actual, con los embalses en servicio.

Dado que las tasas de transporte obtenidas de los aforos sólidos parecen menos consistentes que las resultantes de los estudios batimétricos, para este análisis emplearemos las últimas.

La presa de Mequinenza retiene la totalidad de sedimentos que llegan a su embalse. Por tanto, el volumen retenido permite realizar un cálculo muy ajustado del volumen de sedimento transportado por la corriente del río Ebro. Con los datos de los reconocimientos batimétricos y las series temporales de caudal, se ha obtenido en el apartado 3.5, una relación lineal entre el caudal sólido y el caudal líquido de $0.6 \cdot 10^{-3}$, que reproduce el proceso de sedimentación del embalse (figura 24). Este ajuste nos permite generar la ley de caudal sólido en la ubicación de Mequinenza.

Aunque se ha realizado el mismo cálculo en el embalse de Ribarroja, la incertidumbre sobre la validez de la serie generada de caudal sólido es algo mayor, pues solamente se dispone de una batimetría del año 2007, y la retención de sedimento es parcial. El estudio de Flumen de 2009 aporta el dato de un 40.7% de retención.

Combinando las dos series se ha obtenido la serie de caudal sólido aguas abajo de Ribarroja en dos escenarios, considerando o no la no existencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja.

6.1. Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo del Ebro sin embalses

La serie de caudales combinada se ha generado desde 1967 hasta 2016. En este período la aportación media diaria del río Ebro aguas abajo de Flix es de $33.36 \text{ hm}^3/\text{día}$. La serie de caudales sólidos del Ebro aguas arriba de Mequinenza se ha obtenido con la relación obtenida en 3.5:

$$\frac{Q_{\text{sólido}}}{Q_{\text{líquido}}} = 0.6 \cdot 10^{-3}$$

La serie de caudales sólidos aguas arriba de Ribarroja se obtuvo, considerando el coeficiente de sedimentación correspondiente al valor medio ($0.0741 \cdot 10^{-3}$), de acuerdo con la horquilla de sedimentación que proporcionaba el estudio batimétrico de 2007. Considerando que solamente se retiene el 40% de la aportación sólida, se ha



incrementado este coeficiente para que represente la carga total de la aportación y no solo la de la parte sedimentada:

$$\frac{Q_{sólido}}{Q_{líquido}} = \frac{0.0741 \cdot 10^{-3}}{0.4} = 0.185 \cdot 10^{-3}$$

La aportación sólida media resultante aguas abajo de la confluencia de los ríos Ebro y Segre es de 14700 m³/día. La figura 31 muestra las aportaciones de sedimento acumuladas y referidas al caudal sólido medio. Se aprecia que el transporte de sedimentos era mucho mayor, en las décadas de los años 60 y 70, se estabiliza en los años 80, y desciende desde entonces hasta la actualidad, en un ritmo sostenido. La figura 35 muestra el ajuste lineal que proporciona un caudal de 19700 m³/día. En el período 1986-2016 el caudal sólido medio es de 12600 m³/día (figura 36).

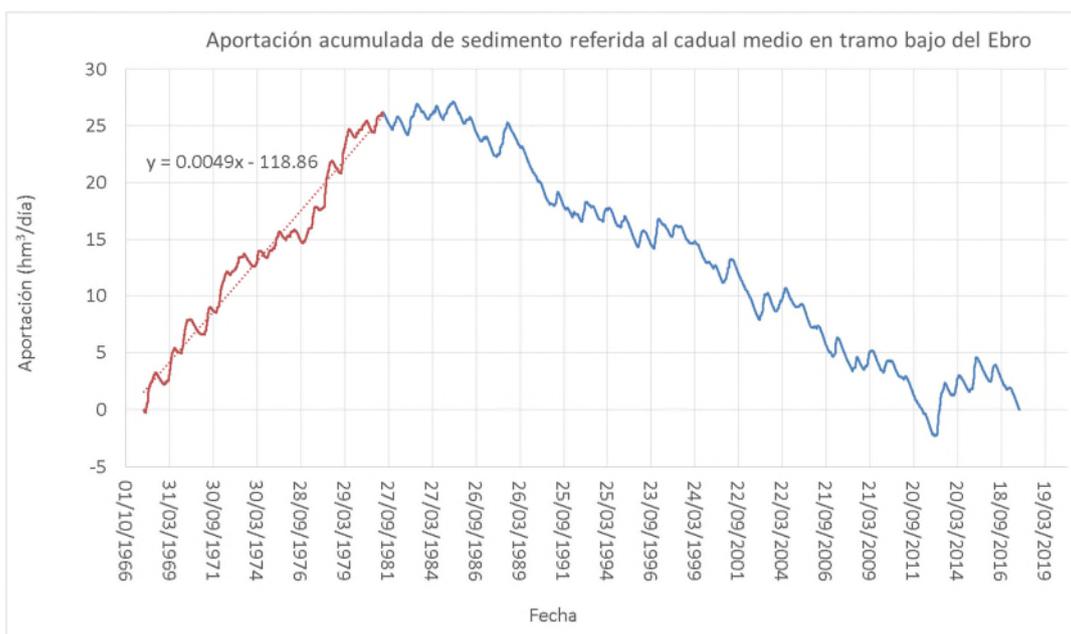
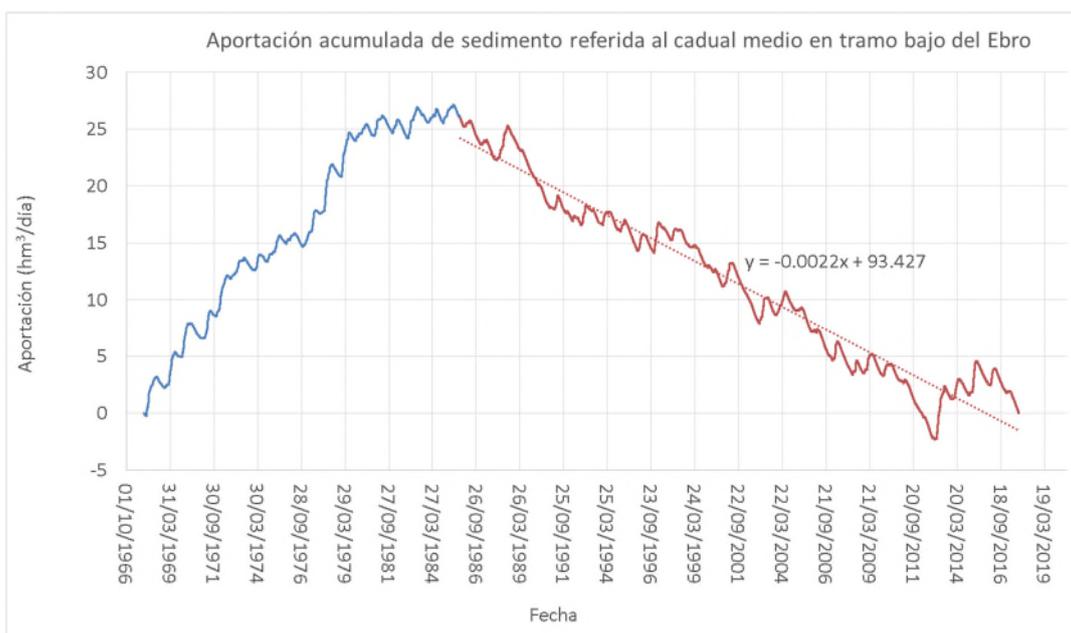


Figura 31. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario sin embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1967-1981





PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

Figura 32. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario sin embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1986-2016

De acuerdo con lo anterior se ha obtenido la tabla 2, que indica las tasas de transporte de sedimento que se habrían producido en el curso bajo del río Ebro desde 1967 a 2016 de no existir los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix.

Tabla 2. Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo sin embalses

Período	Caudal sólido medio (m ³ /día)	Tasa volumétrica (hm ³ /año)	Tasa de transporte (Mt/año)
1967-1981	19700	7.17	8.08
1986-2016	12600	4.58	5.16

Varela y otros (1986) estiman que el año 1964 el aporte de sedimentos, a la altura de Fix era del orden de 8,7 Mt/año, valor que concuerda con los resultados obtenidos en este estudio.

En caso de no existir embalses, en la actualidad el tramo bajo del río Ebro transportaría 5.16 Mt/año, más los aportes menores de las cuencas del tramo bajo.

6.2. Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo del Ebro con embalses

En la situación real, con los embalses de Mequinenza y Ribarroja en servicio, el cálculo de la aportación de sedimento se ha realizado considerando que Mequinenza retiene la totalidad del sedimento aportado por el Ebro, por lo que el único sedimento circulante por el cauce en Flix será el que no es retenido en Ribarroja, es decir, el 60% de las aportaciones conjuntas de los ríos Cinca y Segre. La figuras 33 y 34 muestran la aportación de sedimento acumulada referido al caudal medio del tramo bajo del río Ebro, que de este cálculo resulta ser de 1411.5 m³/día. El caudal medio de sedimento en el período 1967 a 1981 fue de 2111.5 m³/día (figura 33), que equivale a 0.827 Mt/año, mientras que el período de 2004 a 2016 es de 0.375 Mt/año (figura 34), menos de la mitad que en los años 70. De acuerdo con esto, se estima que en la actualidad la aportación de sedimento de río Ebro al delta será de 0.375 Mt/año, más las aportaciones de las pequeñas subcuencas del tramo bajo. La tabla 3 resume estos resultados.

Tabla 3. Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo con embalses

Período	Caudal sólido medio (m ³ /día)	Tasa volumétrica (hm ³ /año)	Tasa de transporte (Mt/año)
1967-1981	0.0020	0.7342	0.8270
1986-2016	0.0009	0.3327	0.3747



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

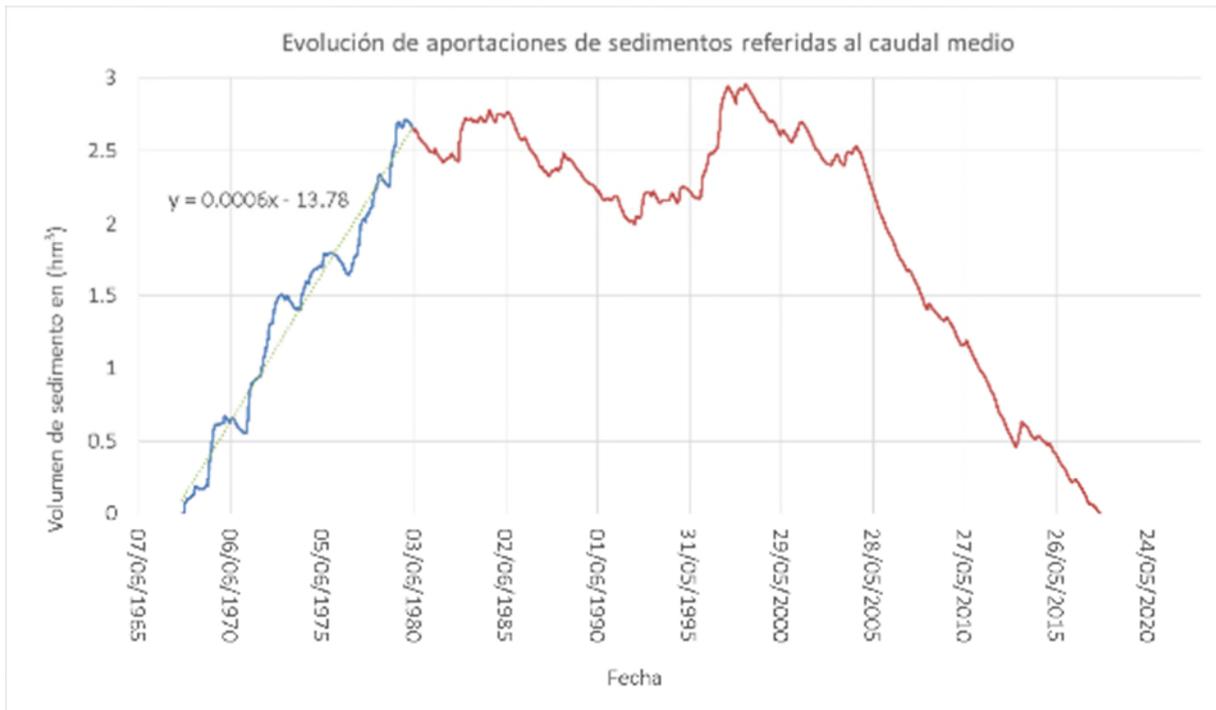


Figura 33. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario con embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1967-1981

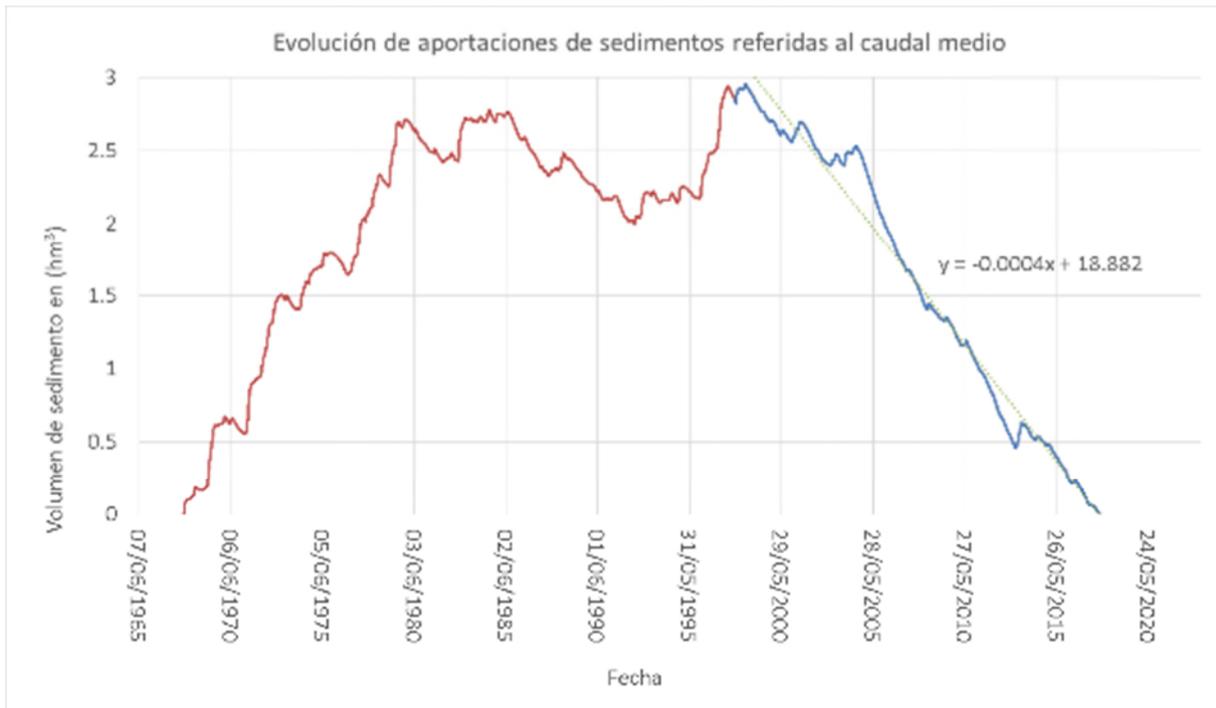


Figura 34. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario con embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1986-2016



7. CONCLUSIONES SOBRE LA CARACTERIZACIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

El objeto del presente documento es analizar el transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro, con especial atención a la influencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja y la caracterización de los sedimentos existentes en ellos. A tal fin, se ha recopilado y analizado la información disponible. Aunque resulta necesario realizar estudios complementarios, los datos disponibles han permitido realizar nuevos análisis como consecuencia de los cuales, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

Respecto al embalse de Mequinenza:

1. La capacidad inicial del embalse de Mequinenza, hasta la cota 121.15 msnsm, se ha reevaluado en 1483.29 hm³ (frente a los 1530 hm³ teóricos) Este valor se ha obtenido vectorizando las curvas de nivel de una digitalización de alta resolución facilitada por la CHE, de la topografía realizada en 1961 en el trabajo "Salto de Mequinenza: Concesión del aprovechamiento del río Ebro y afluentes" (Expediente CHE1957-A60), que utilizó el levantamiento topográfico a escala 1:5.000 de toda la zona del embalse apoyado en una triangulación general realizada por el Instituto Geográfico Nacional.
2. Las grandes dimensiones del embalse de Mequinenza, 108 km de longitud y 1483.29 hm³ de capacidad, lo convierten en una barrera que retiene la totalidad del sedimento que llega al embalse por arrastre de fondo y en suspensión. Además, se deposita una parte de los sólidos disueltos.
3. En cuanto al volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mequinenza, en el año 1982 los estudios batimétricos del CEDEX lo estimaban en 95 hm³ y en el presente informe se ha calculado que en 2012 ascendería a 211 hm³ y en la actualidad (2020) estaría en una horquilla entre 242 hm³ (calculado a partir de los valores de las tasas de aportación de sedimentos estimadas) y 245 hm³ (calculado mediante un ajuste hidrológico).

Las diferencias entre todos estos valores recomiendan ser prudentes en su interpretación y realizar los estudios complementarios indicados en el apartado 7 para poder precisar con mayor rigor los valores reales.

4. Las tasas de aportación de sedimentos al embalse de Mequinenza se estiman en este informe en 6,68 Mt/año en el periodo de 1966 a 1982 y en 4.37 Mt/año entre 1982 y 2012
5. La aportación media de la cuenca del Ebro en Mequinenza desde su puesta en explotación hasta la actualidad, es de 21.1 hm³/día. Este valor era de 27.2 hm³/día hasta el año 1982 donde se aprecia un acusado cambio de tendencia. Desde 1985 hasta la actualidad la aportación media se ha reducido a 17.7 hm³/día. La menor aportación de la cuenca en el período 1982-2012 frente al anterior (1969-1982) hace que la tasa retención haya descendido notablemente.



6. En el año 1982 se habían acumulado 95.42 hm^3 , 37.92 hm^3 de los cuales se acumularon en los últimos 42 km del embalse. La tasa anual de sedimento retenido en el embalse en este período fue de $5.96 \text{ hm}^3/\text{año}$, que con una densidad media del sedimento de 1126.36 kg/m^3 , resulta 6.7 Mt/año .
7. En el lapso de tiempo de 30 años, desde 1982 a 2012, se acumularon en los últimos 42 km de la cola del embalse 46.28 hm^3 , totalizando 84.21 hm^3 , desde 1966 hasta 2012. Se estima que el resto del embalse de Mequinzenza se depositaron 73.97 hm^3 , totalizando 116.25 hm^3 en el período 1982-2012. Si acumulamos a estos sedimentos los 95.42 hm^3 del periodo anterior a 1982, totalizan 211.67 hm^3 .
8. La actual tasa de sedimentación del embalse de Mequinzenza se estima en 4.36 Mt/año , equivalente a $3.87 \text{ hm}^3/\text{año}$.
9. Los sondeos realizados entre los PK 72 y 90 en 2012 han permitido caracterizar el sedimento en este tramo de embalse. Se calcula que de los 40.2 hm^3 de sedimento que existen en este tramo, 10.7 hm^3 son de arena y 3.7 hm^3 son de grava.
10. La información batimétrica disponible hoy en día no permite conocer con certeza la sedimentación existente en Mequinzenza y Ribarroja. En el presente estudio se ha realizado un análisis de la información disponible al objeto de calibrar un modelo simplificado de la evolución sedimentaria de los mismos. Será necesario realizar nuevos estudios batimétricos para disponer de valores más precisos.

Respecto al embalse de Ribarroja:

11. El embalse de Ribarroja regula las aportaciones de los ríos Cinca y Segre. Su aportación media desde 1967 a 2016 es de $12.69 \text{ hm}^3/\text{día}$. Se aprecia, como en el caso de Mequinzenza, un cambio de tendencia en la evolución de las aportaciones, aunque en este caso se identifica una “meseta” más amplia durante las décadas de los años 80 y 90. El caudal medio del período 1967-1980 era $17.71 \text{ hm}^3/\text{día}$, mientras que en el período 2004-2016 es de $8.25 \text{ hm}^3/\text{día}$.
12. La batimetría de 2007 incluida en el “Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja” (Grupo Flumen, 2009) indica que el volumen de sedimento retenido estaba en ese fecha entre 13 y 16.6 hm^3 .
13. Los estudios realizados en el presente informe permiten estimar que en la actualidad (2020) la sedimentación de Ribarroja esté entre 15 y 19.3 hm^3 .
14. Partiendo del valor medio del rango de sedimentación, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0.55 Mt/año , valor que desciende prácticamente a mitad, 0.26 Mt/año en el período 2004-2016.
15. No se dispone de información sedimentológica que permita caracterizar el sedimento del embalse.



En cuanto al tránsito de sedimentos en el curso bajo del Ebro:

16. Se ha realizado un análisis con los registros de aforo sólidos elaborados por el CEDEX hace años en numerosas estaciones de muestreo para obtener las tasas de aporte de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja, si bien los resultados obtenidos deben manejarse con precaución, ya que estos registros infravaloran el transporte de sedimento en suspensión en comparación con los valores obtenidos de los estudios batimétricos de los embalses.
17. Respecto al tránsito de sedimento en el curso bajo sin la existencia de Mequinenza y con los cálculos realizados en el presente informe se concluye que, de no existir los embalses de Mequinenza y Ribarroja, la tasa de transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro habría sido de 8.8 Mt/año en el período 1967-1982, valor que habría descendido desde 1986 hasta la actualidad a 5.16 Mt/año. A estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.
18. En el presente informe se estima que en la actualidad (2020) la tasa de transporte de sedimentos en suspensión aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Ribarroja y Flix es de 0.37 Mt/año (durante los primeros años de tras la puesta en explotación de las presas era de 0.83 Mt/año). Al igual que en el caso anterior, a estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.
19. En la actualidad todo el material de arrastre de fondo de la cuenca del Ebro aguas arriba de Mequinenza, y de las cuencas de los ríos Cinca y Segre, queda retenido en la cola de los embalses. El único sedimento que sale de Mequinenza es el disuelto, que no tiene ninguna influencia en la dinámica sedimentológica del curso bajo. El único sedimento en suspensión que circula por el Ebro a la altura de Flix, es el no retenido en Ribarroja que se estima en un 60% de las aportaciones conjuntas de las cuencas del Cinca y del Segre.



8. ANÁLISIS DE LA COMPLEJIDAD ASOCIADA A LA POSIBLE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS DEL COMPLEJO DE EMBALSES MEQUINENZA-RIBARROJA-FLIX.

A la vista de lo anteriormente expuesto, se procede en este capítulo a analizar la viabilidad técnica y la complejidad asociada de llevar a cabo acciones de movilización de los sedimentos desde estos embalses, aspecto que se ha estudiado con rigor en el trabajo promovido por la CHE (2018), “Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix”, llegando a las conclusiones de viabilidad que se citan seguidamente:

“Las únicas alternativas viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix son la retirada mecánica mediante excavación en seco (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix)”. La viabilidad de la retirada mecánica debe analizarse mediante un estudio económico específico, pero los valores más favorables recopilados en la literatura suponen unos costes muy elevados. Con relación a las medidas de evacuación hidrodinámica, requieren condiciones muy singulares, que no se dan en los embalses del sistema, por lo que las efectividades esperables son muy bajas”.

A continuación se detallan para cada embalse o sistema de embalse las posibles afecciones.

8.1. Condicionantes a la movilización de sedimentos del complejo de embalses Mequinenza- Ribarroja – Flix

En Mequinenza, de acuerdo con el estudio anteriormente citado, la retirada mecánica mediante excavación es una operación simple que utiliza medios convencionales de excavación y transporte para conducir los sedimentos a un punto por determinar, que en cualquier caso estará sumamente alejado. Al margen de su muy significativo coste, requiere obviamente el vaciado de los embalses para dejar libre el sedimento y trabajar sobre él. El periodo de embalse vacío debe ser largo si se quieren extraer los sedimentos en una magnitud significativa por medios mecánicos; se requerirían más de 45.000 viajes de un camión volquete con capacidad de 17,5 m³ para transportar 0,80 hm³, que con una densidad aparente aproximada de 1,25 g/cm³ equivaldrían a 1 millón de toneladas.

Esto hace que la retirada mecánica sea una opción en la práctica difícilmente considerable, especialmente en el embalse de Mequinenza, por el coste de extracción y la lejanía para el transporte, puesto que la distancia es de unos 80 km por carretera para trasladar esos sedimentos mecánicamente hasta Xerta, en la toma de los canales del delta, para su hipotética distribución por los canales, más de dos horas entre ida y vuelta. El embalse de Mequinenza tiene 1.533,8 hm³ de capacidad, ocupa una superficie de 7.720 ha y tiene una longitud de unos 106 km, localizándose el 80% de los sedimentos a más de 50 km de la presa.



Además, el vaciado parcial o completo de Mequinenza por un periodo prolongado causaría grandes efectos socioeconómicos, pues de su regulación dependen actividades como:

- La propia producción hidroeléctrica en su central de 324 MW. La producción media de las últimas décadas se cifra en 700 GWh, siendo una de las centrales consideradas estratégicas por Red Eléctrica Española.
- Los regadíos del delta del Ebro, por medio de sus canales de sus márgenes derecha e izquierda, por un total de 27.000 ha de arrozales y otros regadíos del bajo Ebro.
- El minitrasvase a Tarragona para el abastecimiento y la industria del Campo de Tarragona y otros abastecimientos.
- La refrigeración de la central de Ascó.
- Las múltiples elevaciones que tienen su toma directamente en la lámina del embalse.
- Los usos recreativos de navegación y especialmente pesca que tienen lugar en el embalse.
- La garantía del régimen de caudales ecológicos en la desembocadura del Ebro.

La retirada hidrodinámica mediante lavado es hasta cierto punto posible en el caso de Ribarroja y Flix, como se determina en CHE (2018), pero requiere también el vaciado. Esta modalidad técnica permite arrastrar el material depositado en el embalse aprovechando caudal de avenida, para lo que es necesario disponer de desagües de fondo operativos a cota suficientemente baja y con capacidad de evacuación a baja carga hidráulica para que la operación resulte efectiva. Con las cautelas que se establecen en CHE (2018), y los efectos que luego se detallan, se podrían realizar todas las operaciones para movilizar 1Mt en unos días, trasladándose aguas abajo con el propio flujo de agua.

La técnica de lavado es obviamente mucho más coste-eficiente que la excavación mecánica. El lavado es técnicamente factible en Ribarroja, si bien su efectividad estaría seriamente limitada por una serie de circunstancias desfavorables: “la escasa acumulación de sedimentos, la situación de los sedimentos, distribuidos a lo largo de los 30 km de vaso, la escasa pendiente o la probable compactación de los sedimentos tras haber transcurrido varias décadas sin ninguna acción de lavado”.

Las fórmulas empíricas que se evalúan en CHE (2018), método de Tsinghua, indican “que con un caudal de lavado de 200 m³/s se podría esperar una concentración de sedimento de unos 60 kg/m³, lo que permitiría evacuar 1 Mt en un día”...”sin embargo como se apunta pueden plantearse dudas sobre la viabilidad de la operación en Ribarroja, ya que la situación de los sedimentos es muy desfavorable”. A la operación en Ribarroja debería unirse la de Flix, al estar aguas abajo. En CHE (2018) también se señala que para un rendimiento del 1% en movilización del sedimento habría que utilizar como mínimo un 3% de la aportación anual (unos 350 hm³).

La presa de Ribarroja es de gravedad. Tiene 60 m de altura sobre cimientos, 38,3 m sobre cauce y 362 m de longitud de coronación. La coronación de la presa se sitúa a cota 76,0 m y el cauce a cota 37,7 m. El nivel máximo normal está situado a cota 70,0 m.



El vaso tiene una capacidad de 209,56 hm³ a Nivel Máximo Normal (70,0 m), ocupando una superficie de 2.029 has. El embalse tiene unos 29 km de longitud, lo que supone una pendiente media de $8,3 \times 10^{-4}$ y un ancho medio de 700 m.

El aliviadero de Ribarroja está formado por siete vanos regulados por compuertas de con una capacidad de evacuación de 7.756 m³/s a cota 70,0 m. Además, dispone de varios desagües adicionales o de medio fondo que permiten evacuar 2.635 m³/s. Finalmente dispone de dos desagües de fondo a cota umbral 41,43 con capacidad para 273 m³/s.

La central hidroeléctrica tiene cuatro turbinas Kaplan fabricadas por Escher Wyss para un caudal de 900 m³/s suministrados por cuatro conductos cuyo umbral se sitúa a cota 41,47 m, prácticamente la misma cota que los desagües de fondo. El salto bruto máximo es 30 m y la potencia es 262,8 MW. Al igual que en el caso de Mequinenza, la producción media de los últimos años se sitúa en el entorno de los 700 GWh.

Por su parte la presa de Flix es de gravedad. Tiene 26,3 m de altura sobre cimientos y 400 m de longitud de coronación. El nivel máximo normal está situado a cota 41,05 m. La capacidad del vaso es de 11,41 hm³, ocupa una superficie de 320 has y su longitud es de unos 13 km. El aliviadero de Flix está formado por siete vanos regulados por compuertas con una capacidad de 9.800 m³/s. La central hidroeléctrica tiene cuatro grupos Kaplan fabricados por Escher Wyss, con un caudal de equipo de 400 m³/s. El salto bruto máximo es 12,1 m y la potencia es 42,52 MW.

A la vista de todo lo anterior, conviene por tanto, centrarse primordialmente en Ribarroja y analizar la complejidad que tendría la operación de vaciado para la movilización hidrodinámica de los sedimentos mediante lavado.

8.2. Complejidad del vaciado del embalse de Ribarroja.

La operación de lavado hidrodinámico requiere de un vaciado prácticamente total del embalse, seguido de un periodo de evacuación de sedimentos a través de sus desagües de fondo (y posiblemente intermedios), finalizando con la recuperación del volumen embalsado. Toda esta operación podría estar concluida en un mes, dependiendo de cuanto se quiera alargar el lavado, o también de si se quiere hacer en fases replicando la operación a lo largo de varias semanas durante el año. La operación debería comenzar en un momento favorable en el que se hubieran detectado caudales altos aguas arriba, tanto para el lavado como para el llenado posterior, o con unas condiciones de máximo volumen embalsado en Mequinenza para apoyar la operación con sus desembalses.

Toda operación de vaciado de un embalse reviste su complejidad, de lo que se tienen ejemplos en la propia cuenca del Ebro, y en particular del embalse de Barasona en 1995-1997, tanto por los efectos socioeconómicos como por los medioambientales que pueden provocar. Los socioeconómicos se derivan de los servicios que el embalse deja de prestar a los diferentes usos y actividades o la alteración de los



mismos, así como por los efectos que la deposición de sedimentos puede resultar aguas abajo sobre tomas de agua y las actividades económicas que se desarrollan en el cauce. Los medioambientales se manifiestan principalmente en los efectos del vaciado sobre las comunidades de peces y otras especies que acostumbran a residir embalse y sus hábitat, y aguas abajo también por efectos en la calidad y la acumulación de lodos sobre los ecosistemas del río, agravándose el problema en todos los niveles si estos sedimentos se encuentran contaminados.

Los efectos del vaciado en el propio embalse serían también aplicables a la opción de la retirada mecánica de sedimentos, incluso en mayor grado por requerir un periodo más prolongado. Los efectos aguas abajo solo para el lavado hidrodinámico, o en el caso del mecánico si estos sedimentos se depositaran en el pie de presa de Ribarroja o Flix para su conducción por el flujo del agua.

Todos estos elementos se analizan a continuación con detalle:

A) EFECTOS EN EL PROPIO EMBALSE:

A.1) Efectos sobre la producción eléctrica:

La central hidroeléctrica de Ribarroja tiene una potencia de 262,8 MW, con una producción variable dependiendo de la climatología anual, pero que de media se sitúa en el entorno de los 700 GWh/año, lo que la sitúa cerca del 10% de toda la producción hidroeléctrica de toda la cuenca del Ebro. Es una de las centrales consideradas estratégicas por Red Eléctrica de España para los servicios de arranque autónomo, regulación secundaria y garantía a medio plazo. Se trata además de un embalse que contando con la presa de Mequinenza, inmediatamente aguas arriba, se explota a nivel constante, a una cota media que en el periodo 1999-2018 fue de 66,24 m, CHE (2018).

En CHE (2018) se evalúan las pérdidas de producción en la operación de lavado, tanto por turbinar con menor salto durante el vaciado y llenado, como por dejar de turbinar durante el lavado. Se estiman las pérdidas en unos 10.000 Mwh, por un valor de 500.000 € para evacuar 1 Mt de sedimentos durante la operación de lavado.

En todo caso, en un año medio de producción cifrado en 700 GWh, cada día se producen de media sobre 2.000 MWh, que a un precio medio del mercado diario en 2018 de 58,12 €/Mwh arrojarían 116.000 €/día, al margen de otros posibles pagos por su carácter estratégico, por cada día en que no existe producción de ningún tipo, que es lo que habría que aplicar si se alarga la operación de lavado para tratar de evacuar más sedimentos.

En CHE (2005) se evalúan también las pérdidas de producción que resultarían de bajar durante 15 días el embalse de Ribarroja a la cota 60 para el control del mejillón cebra, obteniendo entre 77.846,10 € y 30.520,27 €, para un precio del mercado eléctrico de 69,6 €/Mwh y varias hipótesis de turbinación y teniendo en cuenta lo que puede turbinar también Mequinenza. Todo el desagüe en este caso se produce turbinando.



Pero estas pérdidas no son lo más importante, pues aparte de su propia producción, en su carácter estratégico está que la central de Ribarroja tiene el cometido de dar respaldo de seguridad a las centrales de Ascó y Vandellós, para situaciones de pérdida de suministro eléctrico exterior o la necesidad de reponer un cero de tensión en la red, estando prevista por parte del operador eléctrico para estos casos la operación en isla desde la central hidráulica de Ribarroja.

Concretamente, dentro de los procedimientos del operador del sistema eléctrico por la pérdida de suministro eléctrico exterior y la necesidad de reposición de tensión en caso de un cero en la red que da prioridad a la alimentación de las centrales nucleares, en particular para las centrales de Ascó y Vandellós “está prevista de modo preferente la alimentación de la central en isla desde la central hidráulica de Ribarroja, disponiéndose de tres modos (automático, por telemando y manual) para formación de la alimentación “en isla”, los cuales se prueban periódicamente” CSN (2011).

El vaciado de Ribarroja, que requeriría por tanto previamente su valoración con Red Eléctrica Española y el Consejo de Seguridad Nuclear, podría entonces afectar el funcionamiento de estas centrales y posiblemente implicar su parada en condiciones de seguridad. Así, antes de preparar cualquier escenario de vaciado de Ribarroja, sería necesario tratarlo con los interlocutores referidos, pues la parada de dos de los más importantes grupos nucleares del país puede tener con certeza un coste inasumible para la operación. Solo los dos grupos de Ascó produjeron en 2018, 16.718,7 GWh, lo que vendrían a ser más de 2,5 millones de € al día a precios del mercado. De hecho, su falta afectaría incluso al precio diario del mercado eléctrico. Se trata por tanto de un elemento que puede resultar crítico.

A.2) Efectos sobre las tomas directas:

En la propia lámina del embalse de Ribarroja existen diversas tomas para abastecimiento y usos agrarios, que además están diseñadas teniendo en cuenta la escasa carrera del embalse. Entre las tomas agrarias destacan los regadíos de la Terra Alta (cota mínima 61,0 m) o los regadíos de Fayón (cota mínima 63,0 m), pero pueden no verse afectados con tal de programar la operación fuera de la temporada de riego. El caso de las tomas de abastecimiento es distinto, y debe proveerse un abastecimiento alternativo para el tiempo que dure el vaciado.

De acuerdo con CHE (2005) las poblaciones que necesitarían toma alternativa de abastecimiento por bajar de cota la lámina de embalse serían: Granja d’Escarpi, Torrente de Cinca, Mequinenza, Almatret, Fayón, Pobla de Massaluca, Ribarroja de Ebro, Nonaspe, considerando factible un abastecimiento alternativo mediante cisternas durante 15 días por un coste aproximado de 233.687,20 €, o lo que es lo mismo 15.579 €/día a precios de 2005. La mayor bajada de cota por el vaciado total no implicaría un mayor coste.



A.3) Efectos sobre los usos recreativos:

El embalse de Ribarroja es uno de los que congregan mayores actividades recreativas en la cuenca del Ebro, especialmente en torno a la pesca de especies alóctonas, principalmente siluro, pero también black-bass o lucioperca, estimándose 72.000 usuarios anuales. También cuenta con actividades de navegación, asociadas o no con la pesca. Además de los varios clubes y sociedades de pesca, existen cámpines y otros alojamientos para los usuarios, muchos de ellos centroeuropeos. CHE (2005) estima las pérdidas en 418.900 € para un periodo de 2 semanas en el que la cota de la lámina de agua se baja a 60 m. Este estudio no encuentra efectos sobre infraestructuras como pantalanés por la bajada de cota. Los efectos radicaban en la merma de actividad, pues las fechas que se contemplaban para la operación de regulación de cota para la lucha contra el mejillón cebra, eran entre el 15 de septiembre y el 15 de octubre por ser las que mejor se adecuaban para su erradicación, pero que todavía pueden considerarse temporada alta a efectos recreativos

Obviamente, puede programarse el vaciado a otras fechas, pero en este caso la situación es muy diferente y no es trasladable el análisis de CHE (2005), porque en nuestro caso un vaciado total afectará de forma drástica a las especies de peces que nutren las expectativas recreativas del embalse, manteniéndose estos efectos probablemente por varios años hasta recuperar la situación de partida.

Ya en CHE (2005) se preveían efectos sobre la ictiofauna al bajar el nivel del agua hasta la cota 60 m, previendo la necesidad de conectar pozas, realizar operaciones de rescate y salvamento, y con todo mortandades y necesidad de repoblaciones, estimando un coste de las medidas correctoras en estos aspectos en el entorno de los 500.000 €. El caso de vaciado completo hasta la cota 40 m tendrá efectos muchísimo más dramáticos y puede necesitar de medidas de compensación por valor de varios millones de euros, especialmente si se decide concentrar el rescate y las repoblaciones solo en especies autóctonas, dejando que el embalse recupere una fauna más naturalizada, al menos temporalmente, y compensando a los usuarios turísticos por pérdidas de carácter más permanente y aunque parte de los usos turísticos pudieran reconducirse a Mequinzenza.

A.4) Efectos sobre el medio ambiente:

Estos efectos en el propio embalse son en parte similares a los comentados en el punto anterior. Con la reducción del volumen embalsado y la superficie inundada se producirán cambios sustanciales en las comunidades biológicas existentes, provocando la muerte de una gran parte, si bien en este caso se trata de un embalse en el que proliferan las especies alóctonas invasoras como el mejillón cebra y el siluro. Se necesitarán actuaciones para paliar los efectos negativos mediante medidas centradas en el rescate de especies autóctonas o en peligro de extinción, como pueda ser el pez fraile o algunos bivalvos.

Si bien, como se ha indicado, podría aprovecharse el vaciado para realizar una cierta renaturalización de especies, y limitar la presencia del mejillón cebra en el embalse,



no se considera posible que esta renaturalización pudiera mantenerse a largo plazo, dada la amplia presencia aguas arriba y abajo del embalse de las citadas especies alóctonas, por lo que pasados unos años se recuperaría la situación de partida.

Por otro lado, el vaciado afectará al espacio natural de los Aiguabarreig del Segre-Cinca, pues se trata de un espacio ribereño situado en el entorno de la lengua del embalse que penetra en el tramo final de estos dos ríos una vez ya unidos. La disminución de la corriente provocada por el embalse de Ribarroja ha incrementado la sedimentación y con ello la masa y extensión forestal ribereña, aumentando las islas fluviales existentes y la aparición de otras nuevas, donde estos hábitats de ribera cuentan con gran desarrollo, favorecidos por una lámina de agua constante. Un vaciado prolongado sin duda los afectará.

A.5) Efectos sobre el estado de la masa de agua ES091MSPF949 Embalse de Ribarroja:

Esta masa de agua de carácter muy modificada se califica en el Plan Hidrológico 2015-2021 en un estado químico bueno, pero con un potencial ecológico inferior a bueno, con incumplimientos en los indicadores biológicos de densidad algal, clorofila a, biovolumen algal, fitoplacton, zooplacton, transparencia y concentración de fósforo. El vaciado alterará estos indicadores. Durante el tiempo de la operación de lavado la masa de agua, pasará de ser embalse a ser río, para luego recuperar su carácter de embalse. Conviene determinar el estado cero de estos indicadores en el momento previo al vaciado y hacer su seguimiento después del posterior llenado, evaluando cómo la masa de agua resulta afectada.

B) EFECTOS AGUAS ABAJO DEL EMBALSE

Los efectos aguas abajo del embalse tienen un grado mayor de incertidumbre, pues dependen principalmente de la magnitud y el comportamiento de los sedimentos una vez movilizados. Sus efectos serían también transitorios pero posiblemente de gran intensidad.

B.1) Efectos sobre el estado y la calidad de las masas de agua:

Durante el vaciado de los embalses a través de los desagües de fondo, el agua procede de las capas inferiores, en general de menor calidad y con concentraciones bajas de oxígeno disuelto, incluso anóxicas, pudiendo causar mortandades de peces.

En principio, se ha llegado a constatar la turbinación de aguas anóxicas, CHE (1996), siendo la cota de toma similar a la de los desagües de fondo; sin embargo en los últimos datos de control del estado en el embalse de Ribarroja, categorizado como eutrófico, en los muestreos realizados el 2 de agosto de 2017 y el 25 de julio de 2018, no se encontró estratificación ni condiciones anóxicas. El tiempo renovación de sus aguas es inferior a un mes. Por tanto, es poco probable que se den mortandades de peces por el desagüe de aguas con bajo contenido en oxígeno disuelto, especialmente



porque hasta ahora no se ha experimentado con la turbinación, y porque como también se señala en CHE (1996), el riesgo de los efectos de la anoxia sobre los peces puede atenuarse por el embalse de Flix, donde los peces pueden encontrar refugio hasta que la situación se normalice.

El riesgo a la calidad aguas abajo es mayor por otros dos factores: la turbidez y la contaminación que puede estar presente en los sedimentos.

El incremento en los niveles de turbidez que provocará el tránsito de sedimentos tendrá varios efectos significativos:

- Afectará a los abastecimientos aguas abajo. No a abastecimientos que tienen pozos en el aluvial, como es el caso de Tortosa, pero sí al Consorcio de Aguas de Tarragona que abastece a unas 700.000 personas e industrias y que toma desde los canales del delta. Una mayor turbidez puede dificultar o impedir el funcionamiento de las estaciones potabilizadoras.
- Puede afectar a la refrigeración de la central de Ascó.
- Se producen efectos en las comunidades biológicas al alterar el paso de la luz. Algunos investigadores también han descrito pérdida de eficiencia en las agallas de los peces, abrasión en los animales e incluso cambios en la composición química del agua (Béjar et al., 2018).

Por otro lado, los materiales sedimentados en el fondo pueden contener contaminantes que pueden movilizarse con el conjunto. En el caso del embalse de Ribarroja, el trabajo CHE (2010) analiza la presencia en los sedimentos de metales que pueden ser debidos a la contaminación de origen antropogénico y señala que *“las concentraciones superficiales de zinc, plomo, cromo, níquel y cobre en el sedimento son inferiores a las descritas para el material transportado por los ríos (...). La concentración de plomo, tanto en superficie como en profundidad (hasta 30 cm) es siempre inferior al nivel umbral de toxicidad. El zinc presenta un patrón similar, aunque hay que destacar un incremento subsuperficial en la estación localizada en la entrada del Matarraña que se acerca al nivel umbral de toxicidad. Las concentraciones de cobre y níquel presentan una variación muy similar entre sí, con valores próximos al umbral de toxicidad en el caso del cobre y concentraciones que superan el umbral y se aproximan al límite de toxicidad probable en el caso del níquel. La concentración de cromo supera el umbral de toxicidad en todo el embalse, pero nunca alcanza el límite de toxicidad probable”*. En definitiva, aunque debe vigilarse, no parecen anticiparse problemas significativos por la composición química de los sedimentos almacenados en Ribarroja.

Un cariz distinto es que la operación de lavado en Ribarroja debe acompañarse con el embalse de aguas abajo de Flix, y en este embalse está desarrollándose la última fase de los trabajos de “Eliminación de la contaminación química del embalse de Flix” mediante la extracción, tratamiento, transporte y vertido controlado de los residuos acumulados en el vaso. En los sedimentos de este embalse se encontraron cantidades apreciables de compuestos organoclorados, metales pesados y radionucleidos, procedentes de la industria química centenaria de Flix. Si, a pesar de



los trabajos efectuados, no se hubieran eliminado por completo, la operación de lavado podría movilizar estos compuestos y dependiendo de la concentración resultante de los mismos afectar:

- A todos los abastecimientos aguas abajo para una población cercana al millón de habitantes. En este caso, para llevar a cabo la actuación de eliminación de los sedimentos de Flix, se desarrollaron una serie de instalaciones de emergencia para su uso en caso de que se produjera la activación de estos contaminantes y su transporte aguas abajo. Estas instalaciones servirían también para este caso.
- A las explotaciones de acuicultura, principalmente moluscos, del delta, a la pesca y a los regadíos, tanto para su desarrollo como para la comercialización de productos.
- A las comunidades biológicas y los propios ecosistemas. La sedimentación modifica el sustrato del lecho.

En conjunto, al resultar afectados elementos de calidad biológicos y físico químicos de las masas de agua, podrá dar lugar al deterioro temporal de su estado y sería necesario evaluar este deterioro y las posibilidades de recuperación en función del régimen de desembalses de sedimentos que se realizara (Tabla 4).

Tabla 4. Estado o potencial ecológicos determinados en el Plan Hidrológico 2016-21 para las masas de agua existentes desde el embalse de Flix, hasta la desembocadura del río Ebro en el mar Mediterráneo.

Código	Nombre	Estado o Potencial Plan Hidrológico 2016-21
ES091MSPF74	Embalse de Flix	Inferior a bueno
ES091MSPF459	Río Ebro desde la presa de Flix al desagüe de la central hidroeléctrica de Flix	Inferior a bueno
ES091MSPF460	Río Ebro desde el desagüe de la central hidroeléctrica de Flix hasta Ascó	Bueno
ES091MSPF461	Río Ebro desde Ascó hasta el azud de Xerta	Inferior a bueno
ES091MSPF463	Río Ebro desde el azud de Xerta hasta la estación de aforos 27 de Tortosa	Bueno
ES091MSPF891	Río Ebro desde Tortosa hasta desembocadura (aguas de transición)	Bueno

Y además habría que tener en cuenta las posibles afecciones en el resto de masas de agua subterráneas, de transición y costeras relacionadas con la operación de desembalse de sedimentos.

B.2) Efectos por la deposición de sedimentos:

La operación de lavado genera una alta concentración de sedimentos en los caudales de desagüe. Su tránsito en los 140 km de río hasta la desembocadura no estará exento de dificultades y los sedimentos se irán depositando en diferentes lugares del río, especialmente en las zonas más cercanas a la presa de Ribarroja, incluyendo el



embalse de Flix, y en todos los obstáculos aguas abajo que hagan disminuir la velocidad del flujo, afectando especialmente a las riberas y tomas de agua.

La experiencia de vaciados anteriores como el de Barasona, o el más reciente de Santolea, indican que estos efectos serán inevitables aunque también reversibles en el medio plazo y con sucesivas crecidas que puedan ir movilizando los depósitos. No obstante, dependiendo de la dimensión final de la operación de lavado, pueden también resultar de una magnitud difícilmente asumible, y ser mayores y más continuos dependiendo de las posibles repeticiones del proceso de lavado, llegando a requerir su retirada mecánica en algunos puntos.

Esta acumulación de sedimentos puede tener varios puntos críticos, entre los que destacan:

- Espacios naturales. En particular pueden verse afectadas la reserva natural de Sebes y el meandro de Flix, y la zona de especial conservación de Riberas e Illes de l'Ebre. Es probable que el tránsito sedimentario y la deposición afecte a los valores naturales de estas zonas, que cuentan con ecosistemas acuáticos de alto interés. Otros espacios ribereños no protegidos pero también de interés pueden verse igualmente afectados. Pueden colmatarse pequeños brazos y sistemas microlagunares ribereños. También pueden resultar afectados los ecosistemas del propio delta.
- La toma de refrigeración de la central nuclear de Ascó. La posible obturación por sedimentos puede ser causa de la necesidad de parar la central nuclear. Dados los protocolos de funcionamiento y seguridad de estas instalaciones, la sola previsión de estos problemas motivaría su parada.
- El azud de Xerta. Los sedimentos que llegasen al azud de Xerta se repartirían entre los caudales derivados en los canales (~50 m³/s) y hacia la desembocadura. En el azud se produce un remanso, reduciéndose la velocidad, y además se produce también un cambio brusco de dirección del flujo que favorecerá la sedimentación en el propio azud, afectando también a las tomas de los canales y la central hidroeléctrica.

Por los canales el tránsito sedimentario tendría un recorrido hasta llegar a los arrozales a través de su red de canales, que para la margen derecha es de 52 km en el canal principal y de 49 km en las 8 acequias secundarias, y para la margen izquierda, de 27 km el canal principal y de 39 km en acequias secundarias, donde pueden producirse depósitos.

La entrada en los canales, con su escasa pendiente y la disminución de velocidad, favorecerá la deposición en los propios canales, especialmente en los tramos iniciales pudiendo llegar a obstruirlos. Más adelante, podría también afectar a las derivaciones para el riego de los propios canales del delta y a las tomas de los canales del Consorcio de Aguas de Tarragona.



La acumulación de sedimentos en el propio lecho del río en la desembocadura y en particular en la bocana, puede impedir la navegación recreativa y aumentar las necesidades del dragado del cauce que se realizan periódicamente.

Debe tenerse presente que una vez movilizados los sedimentos de Ribarroja y después de las deposiciones en tránsito, solo una fracción circulará por los canales del delta y sus acequias secundarias y a través del riego de los arrozales podrá ser incorporada a la planicie deltaica. El resto, la parte más sustancial, llegará hasta la desembocadura y allí será la propia dinámica litoral la encargada de depositarla libremente y no en la llanura deltaica.

Todos los efectos descritos requerirían un análisis más detallado para tratar de ajustar su magnitud y realizar una valoración económica de los mismos.

8.3. Conclusiones sobre la complejidad del movilizado de los sedimentos en ambos embalses.

A la vista de lo anteriormente expuesto, cabe llegar a las siguientes conclusiones iniciales:

1. La remoción de sedimentos del embalse de Ribarroja mediante la técnica hidrodinámica de lavado puede ser factible, si bien con una efectividad de carácter limitado. Sin embargo, el vaciado del embalse de Ribarroja y el flujo de sedimentos aguas abajo puede generar impactos socioeconómicos y medioambientales de gran magnitud.
2. Puede considerarse como el punto más crítico la posible necesidad de parar las centrales nucleares de Ascó y Vandellós al dejar de estar operativa la central hidroeléctrica de Ribarroja que les da respaldo de seguridad. Si realmente esto es así, lo que debería asegurarse con los operadores antes de cualquier otra discusión, la operación de vaciado puede considerarse económicamente inasumible; afectaría incluso al precio del mercado diario de electricidad. Parecido resultaría si el flujo de sedimentos resultante afecta de tal forma a la refrigeración de Ascó que también debe parar su producción.
3. Los usos recreativos del embalse de Ribarroja basados en la pesca de especies alóctonas y en especial del siluro, se verían dramáticamente dañados y tendrían que esperar varios años para recuperarse.
4. Dependiendo de la duración del vaciado, pueden producirse graves efectos en el espacio natural de los Aiguabarreig Cinca-Segre.
5. Si la operación de lavado fuera exitosa, existía un riesgo elevado de una acumulación excesiva de sedimentos a lo largo del cauce aguas abajo que



afecte a numerosos elementos: espacios naturales y ecosistemas acuáticos, tomas de abastecimiento y regadíos, navegación recreativa.

Por lo que tal y como se refleja en el documento, la magnitud de los efectos es tan grande que es esencial realizar numerosos estudios que permitan analizar la problemática con profundidad.

9. RÉGIMEN DE LAS CRECIDAS CONTROLADAS EN EL RÍO EBRO Y GESTIÓN DE LOS DESAGÜES DE FONDO DE LOS EMBALSES

En España la discusión sobre el diseño e implantación de crecidas generadoras se inició a mediados de los años 90. Posteriormente, y una vez asentado su fundamento normativo, las primeras experiencias de descarga de crecidas generadoras han mostrado su importancia para la mejora hidromorfológica y ecológica de las masas de agua asociadas, pero también la trascendencia de realizar un estudio detallado de sus efectos, para introducir mejoras sustanciales en su diseño.

Hasta el momento son pocas las experiencias existentes sobre crecidas controladas, siendo las más relevantes las realizadas en el río Pisuerga (Embalse de la Requejada), en el río Luna (Embalse de Barrios de Luna), en el río Esla (Embalse de Riaño), en el río Cardener (Embalse de la Llosa del Cavall), en el río Llobregat (Embalse de La Baells) y sobre todo en el sistema de embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix del río Ebro.

En estos casos, la descarga de las crecidas se ha conseguido gracias al acuerdo y a la colaboración entre el Organismo de cuenca y los usuarios más directamente afectados por su puesta en marcha. En el caso de las sueltas en el río Ebro destaca, en este sentido, el papel proactivo de Endesa durante el diseño, ejecución y seguimiento de las crecidas controladas. En la tabla 5 se presenta, de manera esquemática, las características y las consecuencias más significativas de la descarga de dichas crecidas generadoras en el río Ebro (Tena et al., 2013; Magdaleno, 2017).

Tabla 5. Características de las crecidas controladas que se vienen liberando en el tramo bajo del río Ebro.

<i>Crecida controlada Río Ebro</i>	
Fecha de descarga	2 por año, a partir de 2002
Caudal punta (m ³ /s) y periodo de retorno asociado (años)	900-1300 / 1.5-2
Duración (h)	16
Volumen (hm ³)	36 (cada una)
Estacionalidad	Primavera y Otoño
Tasas de cambio	Variable, en relación con otros requerimientos técnicos de la crecida
Objetivo principal	Control de macrófitas y mejora de la dinámica hidrosedimentaria
Principales efectos geomorfológicos	Elevada capacidad para la génesis y el transporte sedimentario, pero con un impacto geomorfológico limitado en el conjunto del tramo
Principales efectos ecológicos	Efectos relevantes pero irregulares sobre el control de macrófitas



Nuevas crecidas previstas

Sí

Otras observaciones o comentarios

Se ha evidenciado que el tramo bajo del Ebro se encuentra aún en proceso de ajuste geomorfológico

Hasta el momento esta crecida generadora está teniendo un impacto positivo sobre el control de macrófitas del cauce, si bien, parece que el lecho del río aguas abajo está teniendo problemas al no recibir aportes sedimentarios, que puede motivar la creación de una coraza sobre el lecho, puesto que dichas crecidas pueden movilizar los sedimentos del fondo, sin recibir aportes superiores, pero aún no se conoce con detalle el estado general del lecho y la movilidad existente, siendo necesario desarrollar mediciones directas de campo, experimentos y modelización.

10. ESTUDIOS DE I+D+i A REALIZAR PARA LA MEJORA DE LA DINÁMICA SEDIMENTARIA DERIVADA DEL RIO EBRO.

Las construcciones deltaicas en las desembocaduras de los ríos se producen en periodos de estabilidad del nivel del mar, cuando existe un exceso de sedimentos aportados por el río que no pueden ser evacuados mar adentro por el oleaje, las corrientes costeras o las corrientes de marea. El equilibrio dinámico entre estos factores determina en gran parte la forma que adquiere la desembocadura de un río y su llanura deltaica.

Tal y como se ha analizado en el presente documento, el aporte de material sólido del Ebro en su desembocadura se ha reducido de forma importante durante el siglo XX. Se estima que la aportación sólida media anual que ha alcanzado el Delta en las últimas décadas es muy inferior a la que existía a finales del siglo XIX y principios de siglo XX. Este hecho se debe fundamentalmente a la menor magnitud de las crecidas del río y a la retención producida en los embalses, especialmente en Mequinenza y Ribarroja, durante la segunda mitad del siglo XX.

La falta de aportes sólidos en el río y por tanto de sedimentos que llegan al Delta provocó una adaptación a las nuevas condiciones en los años posteriores a la construcción de los embalses. Este hecho supuso el retroceso del cabo de Tortosa en 1,5 km y una readaptación de la morfología del delta, con un balance neto de sedimentos. Es decir, lo que se erosionaba en unas zonas se sedimentaba en otras. Este ritmo de adaptación fue disminuyendo progresivamente. Con respecto a la subsidencia no existen cuantificaciones totalmente precisas de este proceso, siendo necesario mejorar esta cuantificación para hacer un diagnóstico acertado del proceso y poder llegar a plantear soluciones racionales y eficaces.

El problema de la falta de sedimentos en el Delta ha provocado alcanzar un nuevo equilibrio. Resulta preciso tener una mayor comprensión de todos los factores involucrados y de sus interrelaciones. No obstante, los efectos de este problema deben en cualquier caso contemplarse desde una perspectiva histórica amplia, en la que el Delta se ha manifestado como un espacio vivo y cambiante, extraordinariamente influido por las modificaciones naturales o artificiales de los dos agentes, fluvial y marítimo, que lo modelan. Esta influencia es tal que la configuración



y desarrollo que actualmente muestra el Delta derivan en parte de la deforestación asociada con la puesta en cultivo de la cuenca del Ebro.

Los aportes sólidos están muy relacionados con las crecidas de un río, por lo que es conveniente estudiar previamente su régimen de caudales máximos, que se ha ido progresivamente transformando a lo largo del tiempo, tanto por el clima como por la gestión de los embalses.

Cuando no se producen crecidas extraordinarias en el río, el aporte de sólidos es más reducido. Consecuentemente, los aportes producidos durante la segunda mitad del siglo XX deben ser notablemente inferiores a los de épocas anteriores. Siendo en este punto las crecidas de mayor magnitud ocurridas, cuando también la cuenca del Segre aporta caudales importantes.

El aporte de sólidos en la desembocadura del río Ebro, además del régimen de crecidas del río, es función de cómo se produce la erosión en la cuenca, de las retenciones de los sedimentos en los embalses y de la capacidad para el transporte de material sólido a través de los cauces.

La erosión en las cuencas ocurre principalmente durante los eventos de precipitación máxima y durante las crecidas de los ríos, con una mayor facilidad y rapidez en aquellas zonas donde el suelo se encuentra más desprotegido por tener una menor cobertura vegetal. La sedimentación ocurre en tramos de baja pendiente de los cauces, en las llanuras de inundación, al producirse el desbordamiento en los cauces, y también en los embalses, donde se retienen cantidades importantes de material sólido.

El transporte de material sólido en los cauces puede producirse básicamente de dos formas: por arrastre de fondo y en suspensión. El transporte por arrastre afecta al sedimento de mayor tamaño que viaja por el fondo del cauce. Este transporte no suele llegar a la desembocadura del río en porcentajes significativos y, en una primera aproximación, podría considerarse que los sólidos en suspensión en el tramo final del Ebro deberían ser del orden de los aportes sólidos totales.

Tal y como se recoge en el ETI, la génesis del delta ha estado vinculada con los usos humanos y los ciclos climáticos. La existencia de periodos secos o cálidos, conjuntamente con la acción forestal del hombre han sido determinantes en la intensidad de desarrollo del delta. Todos estos factores contribuyen a disminuir la tasa de erosión de la demarcación y, por tanto, la actividad de la dinámica sedimentaria del delta. La falta de aportes de sedimentos del delta, se ve reforzada por la construcción del embalse de Mequinenza en 1966, a lo que se le añade la posterior construcción del embalse de Ribarroja en 1969.

Con respecto a la subsidencia, se estima valores entre 1-3 mm/año a partir de los últimos estudios realizados con técnicas interferométricas mediante satélite. No se detectan patrones de movimiento de gran extensión ni intensidad.

En este sentido, es de destacar el debate producido en los últimos años respecto a la recuperación del aporte de sedimentos a la desembocadura del Ebro, que necesita la



realización de nuevos estudios cartográficos y de I+D+i, que permitan establecer el conocimiento necesario para poder desarrollar las futuras actuaciones.

10.1. Estudio de la posibilidad de la generación de sedimentos y su transporte en la red fluvial aguas abajo de Flix y caracterización de los sedimentos en las presas de Ciurana, Margalef y Guiamets.

En primer lugar, es necesario estudiar los sedimentos que puede aportar la importante red fluvial existente aguas abajo del Embalse de Flix, que tiene una superficie de cuenca de más de 3.000 km² y casi 400 kilómetros de cauces declarados como masa de agua de la DMA y analizar en ellos la posibilidad de incrementar el transporte en esta red fluvial.

Tal y como se recoge en la tabla 6 y en la figura 35, esta importante red fluvial de 400 km de longitud, tiene al menos 40 obstáculos longitudinales que deben estudiarse para analizar si su permeabilización puede generar la llegada de más sedimentos al Delta. Igualmente existen dos azudes en el eje del Ebro (azud de la Central Nuclear de Ascó y el Azud de Xerta) que deben estudiarse con detalle, para analizar la cantidad de sedimentos que ahora mismo están reteniendo y el efecto barrera que generan ahora y el que generarían en el futuro.

Tabla 6. Tipo y número de obstáculos transversales existentes en la red fluvial del Ebro, aguas abajo del embalse de Flix.

Tipo de obstáculo transversal	Número
Salto vertical	21
Paso sobre paramento	19
Paso entubado	2
Total	42

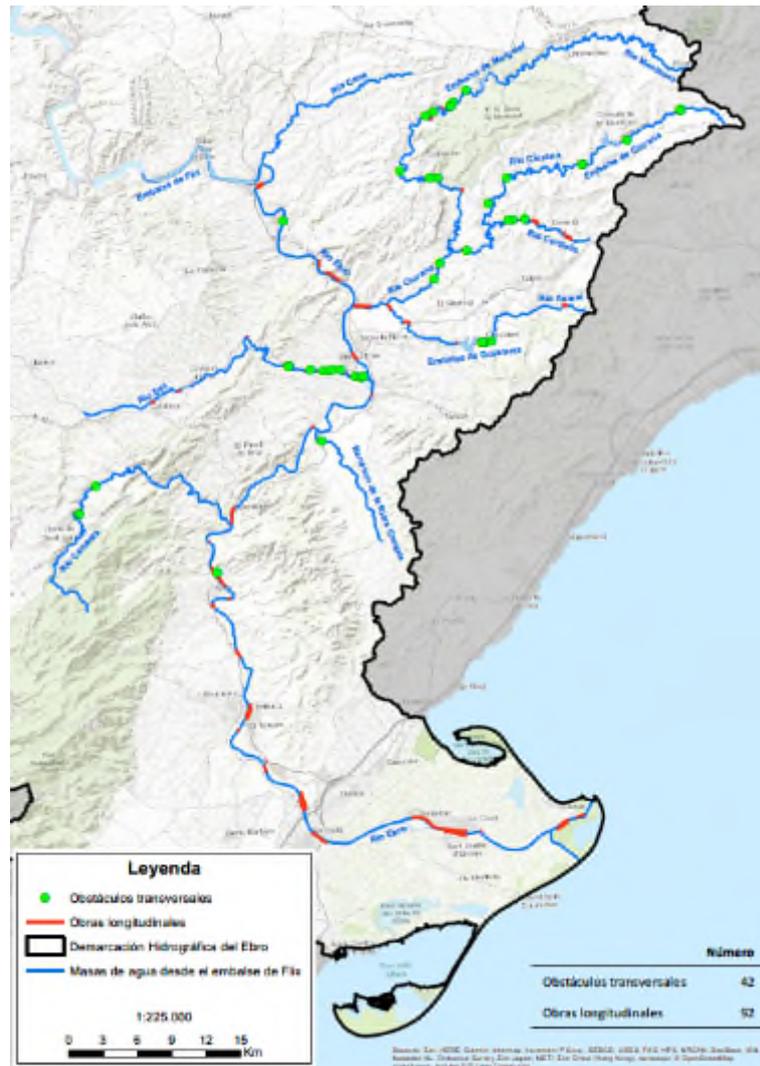


Figura 35: Obstáculos transversales y obras longitudinales existentes en la red fluvial aguas abajo del embalse de Flix.

Igualmente, es necesario realizar un reconocimiento batimétrico de los embalses de Ciurana, Margalef y Guiamets con objeto de conocer el estado de sedimentación de estos embalses. Por ello se van a realizar las correspondientes batimetrías, así como una recopilación de la topografía previa al embalse, con una precisión de unos 5 a 10 cm, siendo necesario para alcanzar esta precisión el empleo de una ecosonda multihaz, que permita un barrido en continuo del fondo del embalse. El producto final será un MDT de 0.5x0.5 m del fondo de los embalses.

Posteriormente es necesario realizar un estudio sedimentológico de los embalses de Ciurana, Margalef y Guiamets con el fin de caracterizar el sedimento de los embalses con especial atención a su granulometría. Se obtendrán muestras en los deltas de cola de los embalses para determinar las proporciones de arcillas y limos, arenas y gravas, y se realizarán ensayos granulométricos de las porciones de arena y grava. En los embalses de Margalef y Guiamets se tomarán una o dos tratando de extraerlas de las zonas más representativas. El embalse de Ciurana tiene dos colas por lo que el número de muestras será el doble.



Una vez desarrolladas estas actuaciones, se procederá a la caracterización de los cauces y los sedimentos de los ríos Ciurana, Montsant, Riera l'Ull del Asma, aguas abajo de los embalses para disponer de la geometría de los tres cauces aguas abajo de los tres embalses anteriores. El producto final será un MDT de 0.5 x0.5 m. Puesto que se trata de ríos con poco caudal, es probable que la información disponible de los vuelos LiDAR de primera y segunda cobertura sean adecuados para que con unos apoyos de campo se pueden generar los MDT. También es importante disponer de información del tipo de sedimento de estos cauces, en especial de la fracción de gravas y arenas, por lo que obtendrán algunas muestras del eje de los mismos para su posterior análisis granulométrico. Se tomarán al menos 5 muestras en el río Ciurana, 3 en el Montsant y 2 en el Riera l'Ull del Asma.

Igualmente es necesario actualizar y disponer de una batimetría actual y detallada del curso bajo del río Ebro, de forma que se tenga información actualizada de la geometría del cauce con precisión suficiente para poder realizar simulaciones numéricas bidimensionales de este tramo de río. La extensión del reconocimiento es de unos 116 km y debe cubrir desde aguas abajo del embalse de Flix hasta la desembocadura. La precisión exigida a los equipos de medida es de unos 5 a 10 cm. Para alcanzar esta precisión resulta necesario el empleo de ecosondas multihaz, que permita un barrido en continuo del fondo del cauce, y que además permita su ejecución en un tiempo razonable. El producto final será un MDT de 0.5x0.5 m del fondo del cauce del río Ebro.

Igualmente que en el caso anterior, se debe realizar una campaña de toma de muestra de sedimentos en el curso bajo del río Ebro para caracterizar el material del lecho del río desde aguas abajo del embalse de Flix hasta la desembocadura del delta. Para ello se realizará una toma de muestras, tanto de la capa superficial del cauce del río, como del estrato subsuperficial. De cada una de las muestras se realizará un análisis granulométrico tanto de las arenas como de las gravas.

10.2. Actualización de la información sobre batimetrías y sedimentos en los embalses de Mequinenza y Flix.

Tal y como se ha presentado en este documento, es necesario actualizar y conocer la situación actual de los sedimentos existentes en Mequinenza y Ribarroja, para lo cual es necesario primeramente realizar una batimetría actualizada de Mequinenza, puesto en Ribarroja acaba de ser realizada por el titular del embalse y luego los correspondientes análisis sedimentológicos.

En el caso de Mequinenza, el levantamiento batimétrico se contará con un equipo de sonda de ultrasonido multihaz montado sobre embarcación que permita coleccionar datos de coordenadas georreferenciadas y cotas relativas al nivel del mar. La precisión de las medidas que se deben exigir a los equipos de medida debe estar acotada entre 5 a 10 cm. En las zonas donde la profundidad no permita el empleo eficiente de una sonda multihaz se empleará una sonda mono haz. La línea de agua así como los



terrenos emergidos del fondo del embalse se levantarán mediante vuelo LIDAR montado sobre dron que proporcione una presión altimétrica de entre 5 y 10 cm.

En esta fase, se realizarán los cálculos y correcciones sobre la base de los datos recolectados, se elaborarán los planos y ficheros informáticos con la información de campo y se generarán modelos 3D corregidos, dando forma al modelo digital del terreno. Se generará un modelo digital del terreno con curvas de nivel vectorizadas de 0,5 m de equidistancia. También se generará un Modelo Digital del Terreno en formato raster de cuadrículas de 0,5 x 0,5 m. Además, se presentará una colección de planos con los datos de campo que dan origen al modelo de terreno, con indicación de puntos acotados obtenidos en campo. Se completará la información topográfica del terreno con fotografías de los depósitos de sedimentos que se encuentre emergidos durante los trabajos de campo y se comparará con la situación del embalse en las batimetrías anteriormente indicadas.

Los trabajos sedimentológicos, tal y como se ha comentado, se realizarán en los embalses de Mequinenza y Ribarroja y se descomponen también en dos etapas. La primera corresponde a los trabajos de campo necesarios para la toma de muestras de los sedimentos y la segunda de laboratorio para la realización de los análisis necesarios para caracterizar la textura y densidad del sedimento.

Antes de realizar el trabajo de campo se debe tener una idea previa de la distribución que los sedimentos pueden adoptar en el vaso al depositarse. La obtención de la batimetría de los embalses de Mequinenza y Ribarroja servirá de base a este efecto. Los distintos tipos de depósitos y su distribución espacial exigen un muestreo en toda la extensión del vaso con objeto de garantizar la representatividad de los datos. Para cada embalse, se realizará un plano director a escala 1:5000 que se presentará una propuesta de los puntos de muestreo, posteriormente se realizará el muestreo, en el que para caracterizar el sedimento fino depositado en toda la superficie del embalse se tomarán muestras del fondo. El número de muestras a tomar viene condicionado por el tamaño del embalse, considerándose en general suficiente la extracción de una muestra cada 4 ha de superficie, en embalses de menos de 100 ha, y en embalses mayores una muestra cada 10 - 50 ha. Teniendo en cuenta las grandes dimensiones de Mequinenza (7540 ha) y de Ribarroja (2029 ha) se considera suficiente la toma de 120 muestras en Mequinenza y 40 muestras en Ribarroja. La cantidad de material que se debe recoger en cada punto de muestreo será de unos 1.000 g.

En las zonas en las que el sedimento está sumergido las muestras se toman mediante una embarcación, dotada de grúa y un torno accionado manual y/o eléctricamente con el que se extraen las muestras mediante dragas y sondas. En las zonas en las que el sedimento está al descubierto o con un mínimo de agua, las muestras se toman mediante muestreadores manuales. Las dragas utilizadas tradicionalmente permiten muestrear superficialmente los depósitos de sedimentos obteniendo un volumen suficiente de muestra.

Con el fin de caracterizar el sedimento grueso (arenas y gravas) del delta de cola de los embalses de Mequinenza y Ribarroja se realizarán sondeos que permitirán obtener las columnas estratigráficas hasta el fondo previo a la construcción de los embalses. Como mínimo está previsto realizar 10 sondeos en la cola de Ribarroja y 20 en la de



Mequinenza, tratando de no solaparse con los realizados por Control de Obra Civil en 2011, entre los PK 74 y 90, medidos por el eje del Ebro con origen en la presa de Mequinenza. De las columnas estratigráficas de los sondeos se obtendrán muestras de cada tipo de material identificado en los estratos del sondeo que también se analizarán en laboratorio. Se estima que de cada sondeo se obtengan un máximo de 5 muestras.

Con toda la información se realizarán mapas digitales con la siguiente información sedimentológica:

- la clasificación de la textura del sedimento (reparto de cada tipo en cada celda)
- densidad del sedimento
- caracterización físico-química del sedimento
- potencia del estrato de sedimento en comparación con 1961,1982 y 2012

Posteriormente se preparará un informe de conclusión de resultados, comparando con la información de otros estudios precedentes, tanto del volumen como de las características físicas de los sedimentos.

10.3. Propuestas de estudios I+D+i para la mejora de la gestión de los sedimentos y bases para la elaboración de protocolos de gestión de sedimentos.

Sobre la base de los puntos anteriores, y empleando todos los antecedentes disponibles, se podrán iniciar estudios o nuevas propuestas para la mejora de la gestión de los sedimentos, tanto de aguas abajo de Flix como, en su caso, desde Ribarroja o Mequinenza.

En este sentido, es imprescindible realizar inicialmente un estudio de las barreras transversales existentes en los cauces aguas abajo de Flix y propuesta de proyectos de permeabilización que permitan una adecuada mejora del tránsito sedimentario, de forma que se minimicen los efectos de las obras transversales existentes.

Por otro lado, como antecedente esencial, sobre la mejora de la gestión del sedimento en los grandes embalses, en el ETI se hace referencia a una propuesta de plan de gestión de sedimentos desarrollado por la Generalidad de Cataluña en el que se plantea la movilización de los sedimentos del embalse de Ribarroja mediante un vaciado del mismo, la aplicación de una serie de pulsos para empujar los sedimentos hacia el azud de Xerta y la distribución por el delta a través de los canales de riego. Igualmente, en el proyecto LIFE ADMICLIM (Proyecto piloto de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático del delta del Ebro) se han realizado inyecciones experimentales de sedimento en la red de canales de riego del delta del Ebro y en el propio río Ebro que deben ser utilizadas como referente en las próximas actuaciones.

Como se ha comentado con anterioridad, en la cuenca del Ebro hay experiencias de vaciados de embalses en varios casos entre los que destacan las de los embalses de



Santa Ana, Barasona, Alloz y Moneva. Todas estas experiencias, conjuntamente con una recopilación de casos a nivel mundial, han sido recogidas en un informe de la CHE citado en el ETI, en el que, con la comparación con 137 casos de embalses del mundo en los que se han realizado experiencias de gestión de sedimentos permite concluir que, previsiblemente, las únicas alternativas viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema Mequinzenza-Ribarroja-Flix son la retirada mecánica mediante excavación en seco (en los tres embalses) y la retirada hidromecánica mediante dragado (en Ribarroja y Flix).

Es por ello que se necesita un estudio científico que, con toda la información dispone, a partir de las distintas herramientas de modelización hidrodinámica existente podrán establecerse alternativas de actuación y con ello, comprobar la posible efectividad de cada una de las alternativas, sus costes y los beneficios que se obtienen en cada caso.

Como estrategia general, tal y como se ha presentado con anterioridad, deberá estudiarse igualmente la capacidad de generación y transporte de sedimentos en la cuenca aguas abajo de Flix, como programa piloto de actuación, y, en función de estas conclusiones, deberán analizarse acciones en Ribarroja o Mequinzenza en su caso.

A partir de todas estas experiencias, se procederá a realizar un protocolo de gestión de los sedimentos en los embalses que mejor contribuyan al incremento del transporte de sedimentos en el río Ebro y afluentes. Este protocolo deberá contener, al menos: por ejemplo:

- Una zonificación del embalse en función de los mecanismos de movilización de los sedimentos existentes en él, zonificando la superficie del embalse por las técnicas previsibles de movilización de los mismos, bien a partir de excavaciones en seco allí donde sea posible dentro del embalse, o extracción por bombes o por aperturas de los órganos de desagüe de los mismos, realizados a partir de la adecuada caracterización físico-química y de contaminantes de los sedimentos.
- Los protocolos de entrega de los sedimentos extraídos del embalse al cauce aguas abajo, en función de la técnica de movilización del sedimento, ubicación de los puntos de entrega, época del año, caudal circulante en el río, condiciones de calidad de las aguas exigidas aguas abajo, etc.
- Régimen de caudales de descarga del embalse necesario para permitir la movilización de los sedimentos en los cauces aguas abajo.
- Mecanismos de monitorización y seguimiento efectivo del transporte de sedimentos aguas abajo, a través de marcaje y trazadores en los mismos y publicación de los resultados mismos en internet. En especial debería cuantificarse el volumen real de sedimento movilizado para evaluar la efectividad de los mecanismos de movilización y la persistencia en el tiempo de esta efectividad.



- Seguimiento de los efectos en la calidad de las aguas (indicadores físico químicos, biológicos y químicos) en el embalse y en el tramo de aguas abajo afectado por la movilización.
- Mecanismos legales y de gobernanza que permitan la puesta en marcha de las distintas actuaciones en coordinación con el titular, usuarios de los embalses y los distintos departamentos de las Comunidades Autónomas afectadas. Además, deberá establecerse de forma expresa, en relación con el titular de la presa, la relación de las actuaciones con las normas de explotación, los protocolos que han de ir asociados a las maniobras a ejecutar con especial indicación de la duración, caudales de descarga, hidroavisos a considerar y todos aquellos temas de seguridad y previsión de eventualidades que puedan surgir.
- Procedimientos de participación y comunicación ciudadana necesarios para aplicar antes, durante y después de la movilización de sedimentos. En especial hay que establecer procedimientos de aviso a todos los usuarios relacionados con el tramo afectado para que tomen las medidas oportunas (abastecimientos, energéticos y regadíos). Constitución, en su caso, o mantenimiento de comités de seguimiento de las operaciones para implicar a la comunidad científica y a la ciudadanía.
- Evaluación y corrección de las posibles afecciones de tipo social, económico o ambiental que pueda generar la movilización de sedimentos. En especial se debe garantizar la calidad del agua de boca en todos los abastecimientos relacionados con el tramo susceptible de ser afectado. Entre las afecciones se destaca la afección al CAT, a la Central Nuclear de Ascó, a los riegos, mariscadores y pescadores. Desde el punto de visto ambiental se destaca la posible afección a la fauna silvestre.
- Procedimientos asociados para disponer de todas las autorizaciones necesarias y protocolos de aviso para la realización de las operaciones y constitución de grupos de coordinación administrativa para hacer un seguimiento de las actuaciones realizadas y buscar la corresponsabilidad de todas las administraciones.
- Hacer un informe de lecciones aprendidas de cada operación de movilización y presentar sus conclusiones de forma pública junto con una propuesta de mejora, de forma que se realice una evaluación de los beneficios de la movilización en el aumento de la resiliencia del Delta del Ebro y propuestas de mejora y un análisis global de costes y de beneficios.



11. SEGUIMIENTO Y MONITORIZACIÓN DEL DELTA DEL EBRO: IMPULSO A LA RED RIADE Y CREACIÓN DEL OBSERVATORIO HIDROLÓGICO DEL DELTA DEL EBRO.

Con todos estos antecedentes, es esencial disponer de herramientas que permitan hacer un adecuado seguimiento y monitorización de la situación actual y de futuros cambios que se produzcan en el Delta del Ebro, para lo cual, se tiene como antecedente la puesta en marcha de la Red de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro (RIADE) que se puso en marcha como parte de las medidas incluidas en el Plan Integral para la Protección del Delta del Ebro (PIPDE) se ejecutaron por parte de Acuamed las obras del proyecto “Programa para la implantación de una red de indicadores ambientales en el Delta del Ebro”, en el cual se implantó una red de puntos de control de indicadores ambientales que permite en estos momentos monitorizar los flujos de agua en el Delta para conocer el estado de las aguas y su evolución futura. Se incluyó también la instalación de un centro de control y un laboratorio de análisis químico y ecológico.

	Canales y Desagües	Estuario- río	Bahías	Lagunas	Total
Calidad	8 (1 de ellos móvil)	2	2	3	15
Caudal	33	1	-	-	34
Transporte de sedimentos	-	5	-	-	5
Piezómetros profundos (Delta)	-	-	-	-	6
Piezómetros superficiales (Delta)	-	-	-	-	12
Subsidencia (Delta)	-	-	-	-	52
Hidrodinámica costera (Radar)	-	-	-	-	3
Mareógrafos (Delta)	-	-	-	-	1

Figura 35. Tabla con el número de sensores por tipología incluidos en la versión inicial de la RIADE ejecutada por ACUAMED

Las obras fueron ejecutadas y finalizadas durante el año 2014, y de forma paralela se suscribieron varios convenios entre el entonces Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y la Agencia Catalana del Agua (ACA), la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y Puertos del Estado con el objeto de ceder a dichos organismos el uso y explotación de la totalidad de las instalaciones incluidas en la actuación, que se habían estado manteniendo por parte de Acuamed.

En relación con Puertos del Estado, se firmó un Convenio el 7 de julio de 2015 para la cesión del uso, explotación científica y mantenimiento operativo de tres instalaciones radiales instaladas en el faro de Salou, playa de Alfacada y en el puerto deportivo de Vinaroz. Estos radares están actualmente plenamente operativos y la



información generada puede consultarse a través de la web de Puertos del Estado, tal y como se puede observar en la imagen siguiente:

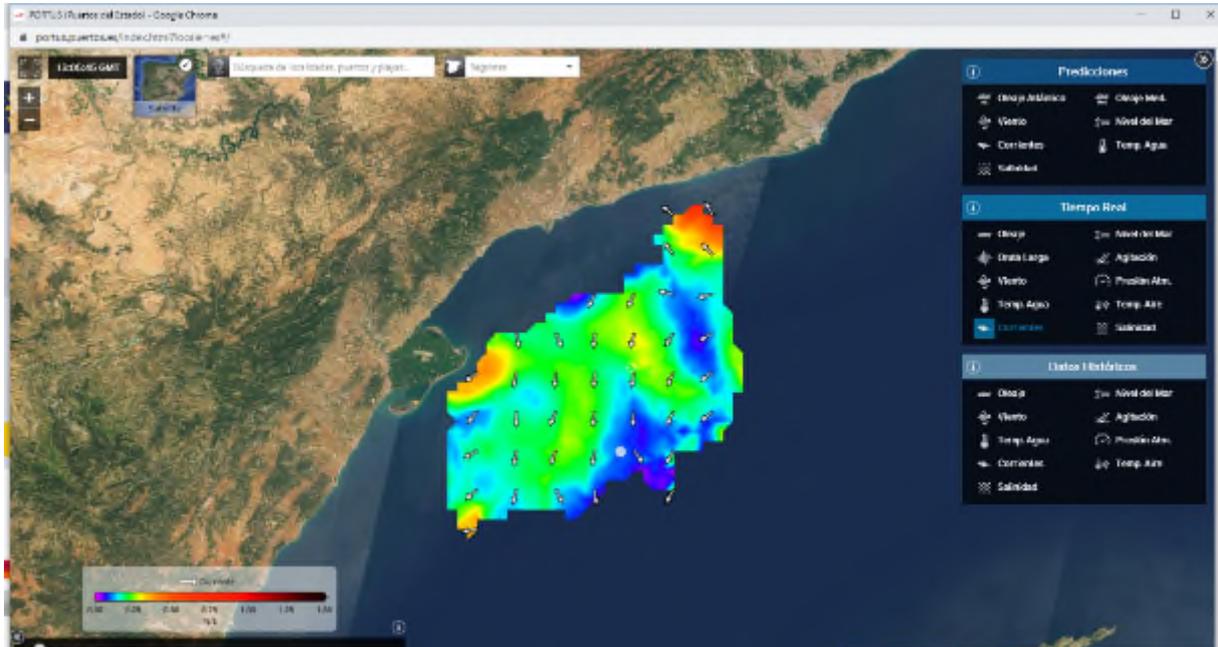


Figura 36. Información de corrientes marinas extraída de los radares de la RIADE gestionados por Puertos del Estado. Información general en la web de puertos del Estado <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx> e información de detalle en <https://portus.puertos.es/index.html?locale=es#/>

Del mismo modo, por un Convenio de colaboración firmado el 5 de Octubre de 2015 con la Agencia Catalana del Agua, la Dirección General del Agua cedió el uso de los sensores e instalaciones de la tabla nº2, consistente básicamente en los piezómetros, en los sensores de calidad de las bahías y las zonas húmedas, los sensores de turbidez (transporte de sedimentos) y los indicadores biológicos (laboratorio), así como del Centro de Control del IRTA.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

Proceso a monitorizar	Equipo instalado	Nº de unidades	Medición
Análisis manual de muestras.	Laboratorio totalmente equipado.	1	Muestras químicas, biológicas y sedimentarias.
Subsistencia.	SEI (Surface Elevation Table) y Horizontes marcadores.	52	Índices de subsistencia del terreno y tasas de compactación del suelo.
Subsistencia.	Comer reflectors.	7	Nivelación geométrica.
Calidad del agua superficial.	Sondas de calidad en bahías.	4	Temperatura, conductividad, pH, oxígeno disuelto, turbidez, potencial redox, nivel, ficocianina, ficoeritrina y clorofila, mediante equipos multiparamétricos.
Turbidez.	Sonda de turbidez y tomamuestras tyn	1+1	Medición de sedimentos en suspensión en río.
Calidad del agua de los acuíferos superficial y profundo.	Piezómetros.	18 (12 superficiales y 6 profundos)	Nivel, temperatura y conductividad.
Recopilación, procesamiento e intercambio de datos.	Centro de control ACA.	1	Integración de datos en el SCADA y adaptación de los sistemas de la ACA de los nuevos puntos de control de la RIADF.
Recopilación, procesamiento e intercambio de datos y difusión de los mismos vía web.	Centro de control IRTA.	1	Integración de datos procedentes de los centros de control de CHE, ACA y Puertos del Estado, con almacenamiento y visualización local y consulta vía web.
Calidad del agua superficial.	Medidor de mercurio.	1	Niveles de mercurio en el río Ebro.
Dinámica hidrológica continental.	Perfilador OTT-Quinier.	1	Niveles de aguas y flujos.

Figura 37. Equipos cedidos a la Agencia Catalana del Agua por convenio firmado el 5 de octubre de 2015. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-1629



Figura 38. Piezómetros en el entorno del Delta del Ebro. http://sig.gencat.cat/visors/VISOR_ACA.html

En relación con el estado actual de la Red gestionada por el ACA, en estos momentos está funcionando, aunque hay varios sensores en reparación. Los sensores de las bahías no están midiendo actualmente, ya que con el tiempo se han deteriorado



mucho (el ámbito físico es muy agresivo para los sensores), siendo en general necesario realizar una evaluación general del estado actual de la red gestionada por el ACA y evaluar los costes de explotación y mantenimiento necesarios.

Finalmente, la Confederación Hidrográfica del Ebro se encargó de gestionar la siguiente instrumentación:

- 34 estaciones en los canales y acequias para la medición de caudales
- 13 estaciones para el control de la calidad del agua
- 3 equipos para el control de la turbidez instalados en estaciones de aforo de la red ROEA e integrados en el SAIH Ebro

La entrega de esta instrumentación a la CHE fue realizada una vez que en mayo de 2015 el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente firmó el Acta de recepción de las instalaciones realizadas dentro del citado “Programa para la implantación de Redes de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro”, haciéndose cargo del mantenimiento, gestión y explotación de esas instalaciones a través de la Confederación Hidrográfica del Ebro el 18 de junio de 2015, momento a partir del cual dejaron de estar mantenidas por ACUAMED y pasaron a gestionarse por la CHE.

Con posterioridad, la Oficina de Planificación Hidrológica realizó un informe, “Propuesta de priorización de los puntos de la Red RIADE en el Bajo Ebro”, con el objeto de establecer unos criterios de priorización de la parte de la red RIADE en función de la dotación económica que podía asumir la Confederación Hidrográfica del Ebro con fondos propios. Para la priorización de las estaciones se utilizaron los siguientes criterios:

- a) Coincidencia entre datos de redes de calidad y de caudal
- b) Tamaño de la cuenca vertiente representativa de cada cuenca

El resultado del informe estableció la idea de implantarlas progresivamente de 10 en 10, con un orden de prioridad sobre las estaciones existentes, habiéndose determinado trabajar sobre los siguientes 10 primeros puntos:

CÓDIGO	PUNTO
C309	RIET
C311	ISLA DE RIU
C318	ESTACIÓN DEL PAL
C324	ULLALS DE BALTASAR
C325	SANT PERE
C326	GOLA VELLA (SANT PERE)
Q961	CAMPREDÓ
Q963	CANAL DEL ALA
Q965	ILLA DE MAR
Q966	CANAL DE LES OLLES



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

Posteriormente, se licitó el contrato del PROYECTO DE PUESTA EN MARCHA DE LOS PUNTOS DE CONTROL PRIORIZADOS DE LA RED DE INDICADORES AMBIENTALES DEL DELTA DEL EBRO, con un importe de 153.796 euros por un periodo de 27 meses. Se comenzaron los trabajos en enero de 2018 y finalizaron en 2020, y han consistido en la ejecución de los siguientes trabajos en los puntos anteriormente citados:

- Instalación de sensores doppler, teniendo en cuenta las instalaciones auxiliares para un correcto funcionamiento de los mismos (cableado, soportes, acondicionamiento de instalaciones).
- Configuración de los sensores doppler instalados.
- Puesta en servicio de las instalaciones.
- Revisión y ajustes de las instalaciones puestas en marcha.

A continuación se muestran imágenes del estado actual de la web del SAIH del Ebro y de los trabajos en ejecución:

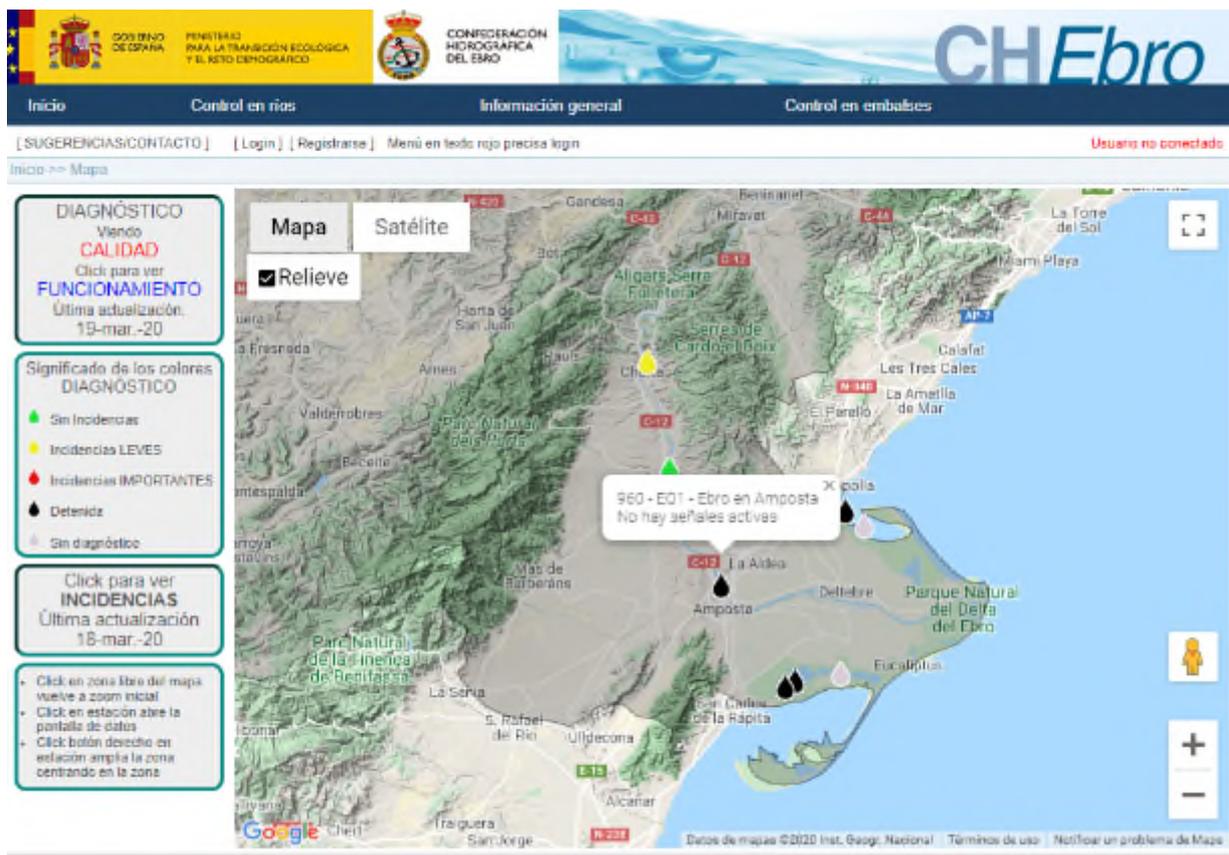


Figura 39. Información de la web actual del SAIH del Ebro en materia de calidad de las aguas en el Delta del Ebro

En las siguientes imágenes se muestra ya la información interna en la CHE dentro del proyecto anteriormente citado.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

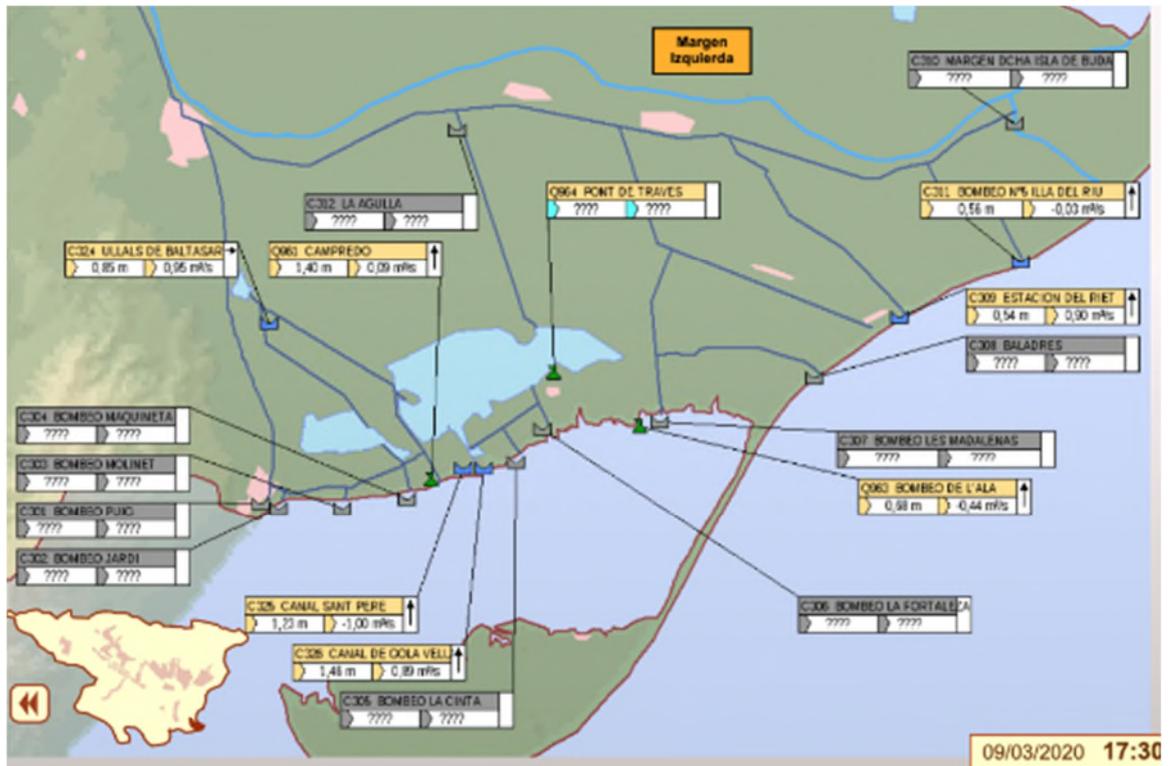


Figura 40. Estaciones de cantidad de la margen derecha del Delta del Ebro

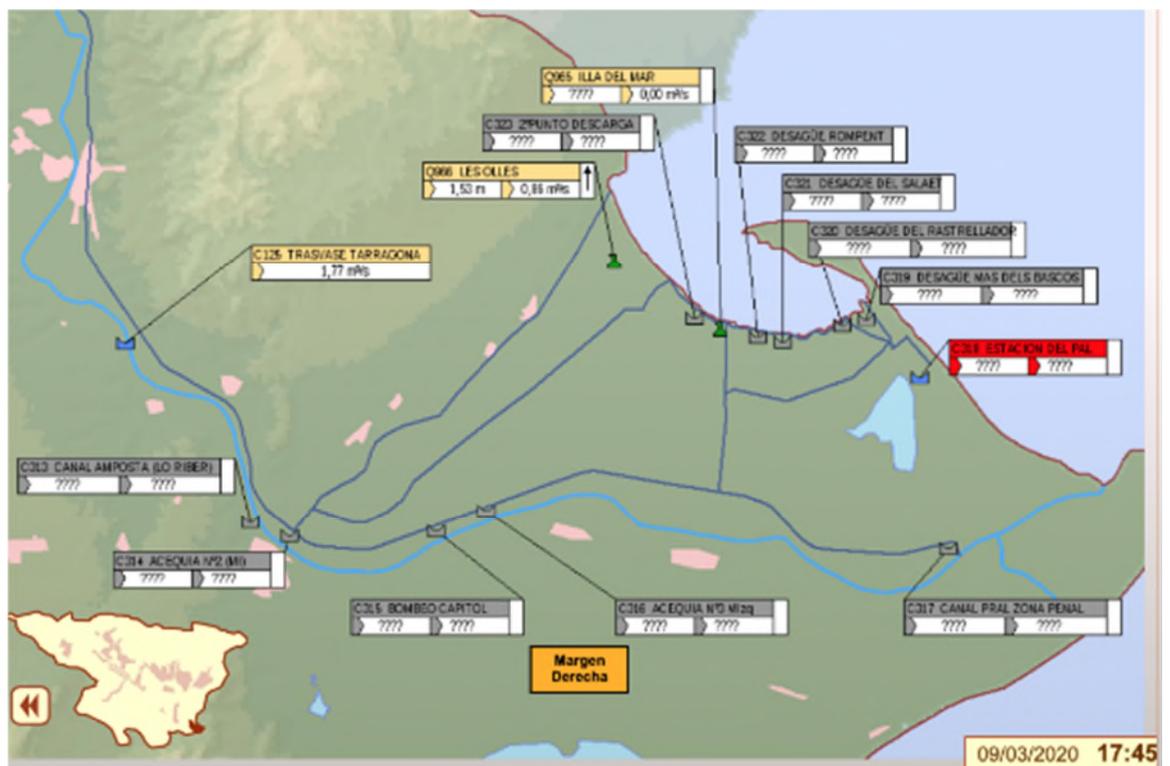


Figura 41. Estaciones de cantidad de la margen izquierda del Delta del Ebro



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

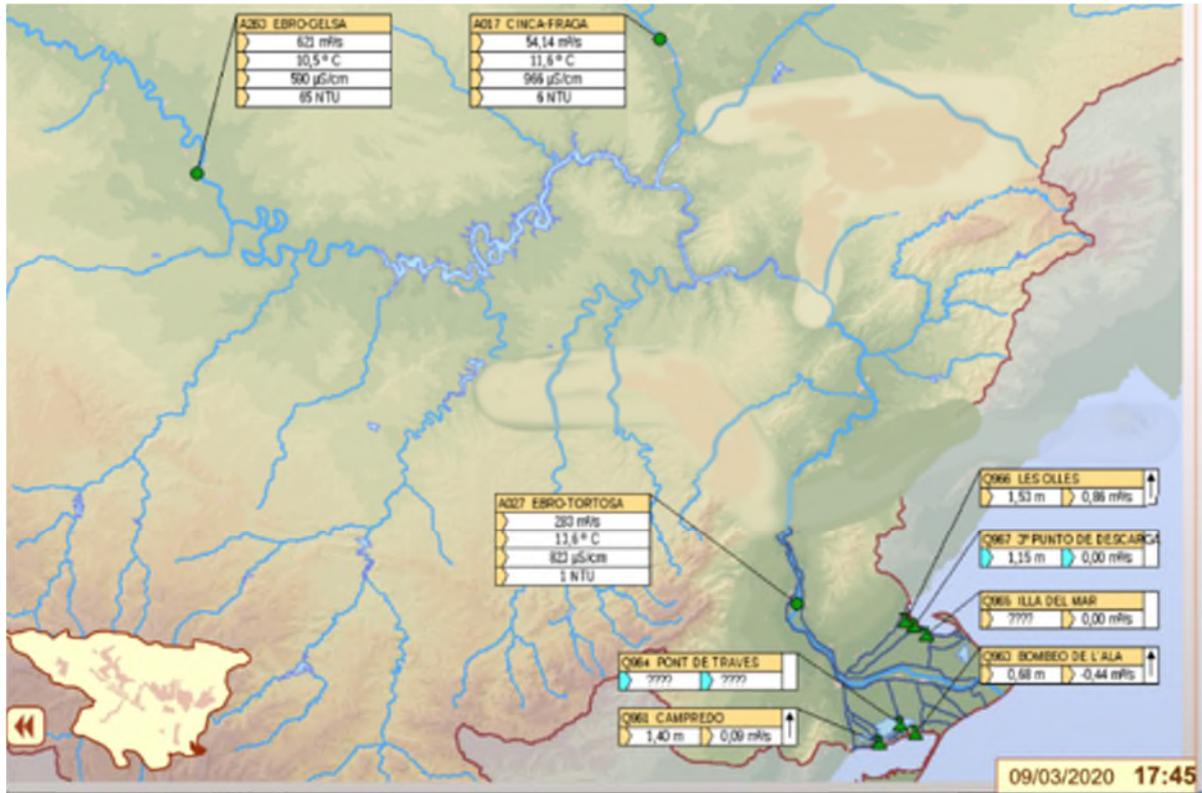


Figura 42. Estaciones de calidad y turbidez

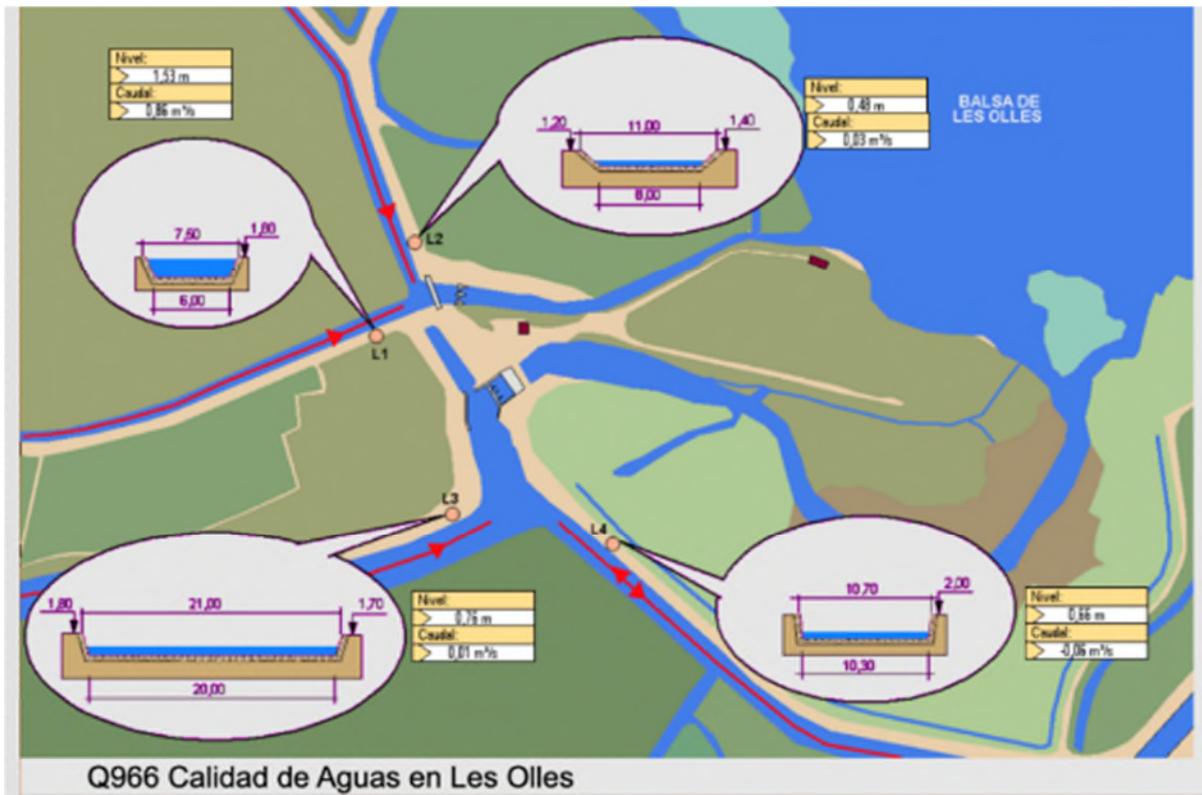


Figura 43. Esquema de la estación de calidad de les Olles



En este sentido, en el marco de este plan de acción, y conforme al ETI y PHC, se considera importante actualizar toda la información asociada en la RIADE, puesto que el resto de actuaciones que se plantearán en el futuro necesitan tener una importante caracterización de la situación actual y su evolución en el futuro. En concreto se propone la creación del “Observatorio hidrológico del delta del Ebro”, centralizado en las plataformas del SAIH del Ebro y de la Agencia Catalana del Agua, que integre toda la información y conocimiento generado durante estos trabajos.

En los últimos años se viene produciendo un debate respecto a la merma en el aporte de sedimentos al delta y la tasa de subsidencia. Resulta fundamental poder disponer de datos precisos de carácter empírico de la subsidencia de toda la superficie deltaica. Tal y como se refleja en este documento, el ETI refleja la necesidad igualmente de avanzar en estos trabajos.

Como antecedente, dentro de los trabajos del Plan Integral para la Protección del Delta del Ebro y concretamente de la implantación de la Red de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro (RIADE), en 2012 ACUAMED realizó una “nivelación de precisión en el delta del Ebro” a lo largo de varios itinerarios por el interior del delta y dando cota a la instrumentación de la RIADE, sumando 112,6 km. Por otro lado, en ese mismo año 2012, la Sección de Topografía y Cartografía de la CHE, llevó a cabo una “nivelación de precisión en el canal de la margen izquierda del río Ebro (Tortosa-Deltebre)” en un itinerario de 28,3 km, en el que además se rescataban y nivelaban tres referencias conservadas de la nivelación que realizó la Confederación Sindical Hidrográfica del Ebro en 1927.

Habiendo transcurrido más de 8 años de dichas nivelaciones, se considera altamente conveniente volver a realizar una nivelación de precisión de estos itinerarios, para verificar posibles movimientos altitudinales de las referencias y tener datos empíricos de la subsidencia que pueda haber acaecido en dicho periodo.

Dada la importancia de realizar estas tareas con la máxima precisión y los mayores estándares de calidad, se ha solicitado el asesoramiento y la colaboración del Instituto Geográfico Nacional. Fruto de esta colaboración se plantea que este trabajo de nivelación de alta precisión siga los criterios y estándares de la Red Española de Nivelación de Alta Precisión (REDNAP) de tal modo que además pueda integrarse en REDNAP una línea en el Delta del Ebro que sirva de referencia en el futuro para nuevas mediciones.

El objeto de este contrato es pues la realización de trabajos de topografía de nivelación de alta precisión en el delta del Ebro en una longitud de 141 km y disponer con ello de datos empíricos de subsidencia.



PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

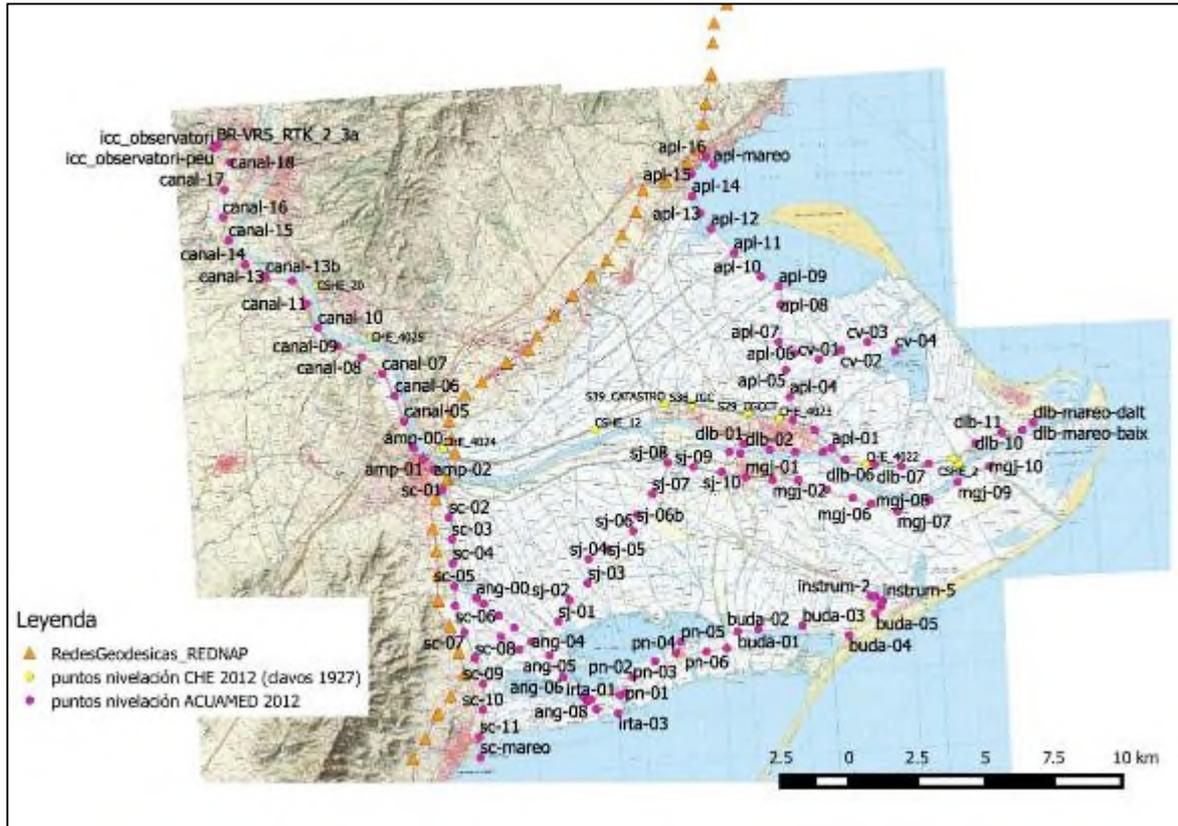


Figura 44. Red de puntos de nivelación en el Delta del Ebro

Con todo este trabajo, se realizará un informe que incluirá un análisis comparativo de las diferencias de nivelación halladas entre las nivelaciones de 2012 y la realizada en la actualidad.



12. REFERENCIAS

ACA (2009). *Balance de sedimentos del tramo final del río Ebro. Documento preliminar*. Agencia Catalana del Agua, enero 2009.

Balada, R., A. Espanya, A. Martinez Vilalta, J. Martí, I. Juan, A. Canicio y X. Ribas, (1997). *El Delta del Ebro*. Ediciones Jaguar. Libro editado en colaboración con Diputación de Tarragona.

Bayerri, E. (1935). *Historia de Tortosa y su comarca*. Imprenta moderna del Aguerri. Tortosa.

Béjar M. et al. (2018). *Efectos de las extracciones de áridos sobre el transporte de sedimentos en suspensión en ríos de montaña (alto río Cinca, Pirineo central)*. Cuadernos de investigación geográfica. Universidad de La Rioja.

Catalán, J.G. (1969). *Química del agua*. Editorial Blume.

CEDEX (1971). *Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-Octubre de 1970*. Informe Técnico para la Dirección General de Obras Hidráulicas. Centro de Estudios Hidrográficos, 1971.

CEDEX (1982). *Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza*. Informe técnico para la Dirección General Obras Hidráulicas. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

CEDEX (2002). *El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Centro de Estudios Hidrográficos. Inédito.

CHE (1996). *Diagnóstico y gestión ambiental de embalses en el ámbito de la cuenca hidrográfica del Ebro*.

CHE (2005). *Proyecto de regulación de la cota del embalse de Ribarroja para el control de la población del mejillón cebra*.

CHE (2010). *Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja*.

CHE (2016). *Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Ebro*.

CHE (2018). *Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix*

CHE (2020). *Esquema de temas importantes. Tercer ciclo de planificación hidrológica 2021-2027*.

Control de obra Civil (2011). *Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro". Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Control de obra Civil (2012). *Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.



- CSN (2011). *Pruebas de resistencia realizadas a las centrales nucleares españolas. Informe final*. Consejo de Seguridad Nuclear. Diciembre 2011.
- DGPC (1978). *Plan Indicativo de Usos del Dominio Público Litoral del Delta del Ebro*. Dirección General de Puertos y Costas. MOPU.
- ECOHYDROS (2008). *Aplicación de tecnologías acústicas en la detección y evaluación de poblaciones de peces y mejillón cebrá en los embalses de la cuenca del Ebro*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Gorría (1877). *Desecación de las marismas y terrenos pantanosos denominados de Los Alfaques*. Ministerio de Agricultura.
- Grupo Flumen (2009). Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Guillén, J. y Palanques, A. (1992). *Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River*. *Sedimentology* 39: 567-579.
- Guillén, J., Díaz, J.I. y Palanques, A. (1992). Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo en el río Ebro al medio marino.
- Ibáñez, C, Canicio, A., Day, J.W., Curcó, A. (1997). Morphologic development, relative sea level rise and sustainable management of water and sediment in the Ebre Delta, Spain. *Journal of Coastal Conservation* 3: 191-202.
- Lechuga, A., López, J.A. (1997). *Evolución reciente del Delta del Ebro. Aportes de sedimentos por el río. El oleaje y el transporte sólido litoral*. Revista de Ingeniería Civil, 164: 99-107.
- Magdaleno, F. (2017). Experimental floods: A new era for Spanish and Mediterranean rivers? *Environmental Science & Policy* 75: 10-18.
- Palanques, A. (1992). *Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo en el río Ebro al medio marino*.
- Palanques (1987). *Dinámica sedimentaria, mineralogía, y micro-contaminantes inorgánicos de las suspensiones y de los sedimentos superficiales en el margen continental del Ebro*. Tesis Doctoral, UPC.
- Romeo, R. (2018). *La gestión de los sedimentos de los embalses*. Presentación.
- Romeo, R. (2020). *Gestión de los sedimentos en los embalses del bajo Ebro*. Presentación.
- Sanz Montero, M.E.; Avendaño Salas, C.; Cobo Rayán, R. (2001). Influencia del complejo de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix (río Ebro) en la morfología del cauce situado aguas abajo. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 14(1-2): 3-17
- Serra, J., Colombo, F., Canals, M. y Guillén, J. (1990). *Comportamiento hidráulico y sedimentario del río Ebro, entre Tortosa y Amposta (Tarragona, España)*. Geogaceta, 8: 107-109.



Tena A, Batalla RJ, Vericat D (2012). Reach-scale suspended sediment balance downstream from dams in a large Mediterranean river. *Hydrological Sciences Journal* 57: 1–19.

Tena, A., Batalla, R.J. (2013). The sediment budget of a large river regulated by dams (The lower River Ebro, NE Spain). *Journal of Soils and Sediments* 13: 966–980.

TRAGSATEC (2012). *Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.

UPM (2018). *Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro. Fundación Agustín de Betancourt (Profesor responsable D. Luis Garrote de Marcos).

Varela, J.M., A. Gallardo y A. López de Velasco, 1986. Retención por los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Efectos sobre los aportes al delta del Ebro. Sistema integrado del Ebro. M-G. Mariño, ed. Gráf. Hermes, 203-219.



ANEJO 4. PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL BORDE LITORAL DEL DELTA DEL EBRO



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO
MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

PLAN DE ACTUACIÓN PARA LA MEJORA DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL ÁMBITO DEL DELTA DEL EBRO

NOTA TÉCNICA

CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS EXISTENTES EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA Y RIBARROJA Y EN EL CURSO BAJO DEL RÍO EBRO (Tarea 2.1)

Madrid, mayo de 2020



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
2.	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL TRANSPORTE DEL SEDIMENTO EN EL TRAMO BAJO DEL RÍO EBRO. REVISIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN TÉCNICA	7
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	7
2.2.	RECONOCIMIENTO BATIMÉTRICO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA (ZARAGOZA). SEPTIEMBRE-OCTUBRE DE 1970 (CEDEX, 1971)	8
2.3.	PLAN INDICATIVO DE USOS DEL DOMINIO PÚBLICO LITORAL DEL DELTA DEL EBRO (DIRECCIÓN GENERAL DE COSTAS, 1978).....	10
2.4.	RECONOCIMIENTO BATIMÉTRICO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA (CEDEX, 1982)	10
2.5.	EL MEDIO AMBIENTE HÍDRICO EN EL DELTA DEL EBRO (CEDEX, 2002; INÉDITO) .	13
2.6.	APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS ACÚSTICAS EN LA DETECCIÓN Y EVALUACIÓN DE POBLACIONES DE PECES Y MEJILLÓN CEBRA EN LOS EMBALSES DE LA CUENCA DEL EBRO” (ECOHYDROS, 2008)	14
2.7.	BALANCE DE SEDIMENTOS DEL TRAMO FINAL DEL RÍO EBRO (ACA, 2009)	14
2.8.	ESTUDIO DE LA DINÁMICA SEDIMENTARIA Y BATIMETRÍA DE PRECISIÓN DEL EMBALSE DE RIBARROJA (GRUPO FLUMEN, 2009)	14
2.9.	EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LOS LODOS ACUMULADOS EN LA COLA DEL EMBALSE DE MEQUINENZA (CONTROL DE OBRA CIVIL, 2011)	15
2.10.	APROXIMACIÓN AL VOLUMEN DE SEDIMENTOS DEL EMBALSE DE MEQUINENZA EN 2008 (TRAGSATEC, 2012)	17
2.11.	NIVELACIÓN DE PRECISIÓN Y ESTIMACIÓN DE LA ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN EL EMBALSE DE MEQUINENZA (CONTROL DE OBRA CIVIL, 2012)	17
2.12.	EVALUACIÓN PRELIMINAR SOBRE LAS POSIBILIDADES DE RESTAURACIÓN DEL TRÁNSITO SEDIMENTARIO EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA-RIBARROJA-FLIX (UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2018)	21
2.13.	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	21
3.	CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA	24
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	24
3.2.	REEVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD INICIAL DEL EMBALSE DE MEQUINENZA	24
3.3.	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO HASTA 1982	27
3.4.	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO HASTA 2012	30
3.5.	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO EN 2020 POR AJUSTE DE LA TASA DE SEDIMENTACIÓN	37
3.6.	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO ACUMULADO EN 2020 POR AJUSTES HIDROLÓGICOS.....	38
3.7.	CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DE LA COLA DEL EMBALSE DE MEQUINENZA....	43
3.8.	RESUMEN	46
4.	CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE RIBARROJA	47
5.	REVISIÓN DE DATOS DE AFORO SÓLIDO REALIZADOS POR EL CEDEX	51
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	51
5.2.	APORTES DE SEDIMENTO EN EL EMBALSE DE MEQUINENZA	52
5.2.1	<i>Aportaciones del Ebro en Gelsa.....</i>	53
5.2.2	<i>Aportaciones del Martín en Escatrón</i>	55
5.2.3	<i>Aportaciones del río Guadalope en Caspe.....</i>	57
5.3	APORTACIONES AL EMBALSE DE RIBARROJA.....	58
5.3.1	<i>Aportación de sedimentos del río Cinca en Fraga.....</i>	59
5.3.2	<i>Aportación de sedimentos del río Segre en Seros</i>	62



6.	INFLUENCIA DE LOS EMBALSES DE MEQUINENZA Y RIBARROJA EN LA DINÁMICA SEDIMENTARIA DEL CURSO BAJO DEL RIO EBRO.....	65
6.1.	TASAS DE TRANSPORTE SEDIMENTO EN EL CURSO BAJO DEL EBRO SIN EMBALSES	65
6.2.	TASAS DE TRANSPORTE SEDIMENTO EN EL CURSO BAJO DEL EBRO CON EMBALSES	67
7.	ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS	71
8.	CONCLUSIONES	72
9.	REFERENCIAS	75
ANEXO 1 Apartado 1.8.4 “Aportes sólidos en el Delta” del informe “El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro”. CEDEX (2002), inédito		77



1. INTRODUCCIÓN

El pasado 27 de febrero de 2020 se celebró en el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico la primera reunión de coordinación para la mesa técnica del Delta del Ebro con la asistencia de representantes de la Dirección General del Agua, de la Dirección General de la Costa y el Mar, de la Confederación Hidrográfica del Ebro y del CEDEX (Centro de Estudios de Puertos y Costas y Centro de Estudios Hidrográficos).

Para la definición de las actuaciones a realizar para la mejora del régimen sedimentario en el entorno del Delta del Ebro se acordó en dicha reunión un plan de trabajos consistente en la ejecución de las siguientes tareas a lo largo del año 2020:

- 1.1 Actualización del estado de los distintos sensores y plataformas tecnológicas de la RIADE (Red de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro).
- 1.2 Realización de propuesta tecnológica para el completado de la red RIADE y sostenimiento a largo plazo de la misma
- 1.3 Portal web de indicadores ambientales del Delta del Ebro
- 2.1 Caracterizar los sedimentos existentes en los embalses con la información disponible y propuesta de estudios y trabajos
- 2.2 Realización de los estudios necesarios para actualizar la caracterización de los sedimentos existentes en embalses
- 2.3 Evaluar la complejidad asociada al vaciado de los embalses.
- 2.4 Determinación del contenido del estudio de dinámica fluvial a realizar: contenido y necesidades de información.
- 2.4 Estudio del balance sedimentario, considerando el cambio climático y estimación de necesidades de sedimento.
- 2.5 Estudio general de las posibilidades de generación de sedimentos en el tramo de aguas abajo de Flix hasta desembocadura
- 2.6 Ejecución del estudio de dinámica fluvial a realizar.
- 2.7 Propuesta de medidas de gestión
- 3.1 Recopilación de datos hidrológicos e hidráulicos en relación con las avenidas generadoras realizadas hasta la fecha
- 3.2 Diseño del estudio de caracterización del estado del lecho del río Ebro
- 3.3 Desarrollo del estudio de caracterización del estado del lecho del río Ebro
- 3.4 Propuesta de diseño de nuevas crecidas generadoras

La tarea 2.1 “realización de los estudios necesarios para actualizar la caracterización de los sedimentos existentes en embalses” fue encomendada al Centro de Estudios Hidrográficos y la presente Nota Técnica resume los trabajos realizados para su desarrollo.

Para la realización de este estudio se han revisado diferentes documentos técnicos y publicaciones científicas. En el apartado 2 de esta Nota Técnica se ha incluido un resumen de las conclusiones fundamentales de aquellos estudios que han resultado más relevantes para la realización de este trabajo.



En los apartados 3 y 4 se cuantifica y caracteriza el sedimento retenido en los embalses de Mequinenza y Ribarroja, respectivamente, para lo que se han realizado nuevos estudios que actualicen los trabajos realizados hasta la fecha.

En el apartado 5 se revisan los datos de los aforos sólidos realizados por el CEDEX durante años en la cabecera de los embalses de Mequinenza y Ribarroja para estimar las tasas de aporte de sedimentos a dichos embalses. En base a los resultados anteriores se ha obtenido, en el apartado 6, la tasa actual de transporte sedimento existente en el curso bajo del río Ebro, así como la influencia que sobre ella tienen los citados embalses.

Con los estudios anteriores se alcanza el objetivo propuesto para este documento. Sin embargo, la restauración de la dinámica fluvial que garantice unas condiciones hidromorfológicas aceptables en el curso bajo del río Ebro, es un objetivo mucho más ambicioso y requiere de la realización de multitud de estudios complementarios y multidisciplinarios. En el apartado 7 se indican los estudios necesarios desde el punto de vista de la hidráulica fluvial.



2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL TRANSPORTE DEL SEDIMENTO EN EL TRAMO BAJO DEL RÍO EBRO. REVISIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN TÉCNICA

2.1. Introducción

Durante los últimos años se han realizado una gran cantidad de estudios técnicos, promovidos fundamentalmente por la Confederación Hidrográfica del Ebro y por la Dirección General del Agua, encaminados a caracterizar el tránsito sedimentario en el curso bajo del río Ebro y en las entradas en los embalses de Mequinenza y Ribarroja. En concreto, los principales estudios desarrollados han sido los siguientes:

- Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-octubre de 1970 (CEDEX, 1971)
- Plan Indicativo de Usos del Dominio Público Litoral del Delta del Ebro (Dirección General de Costas, 1978)
- Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (CEDEX, 1982)
- El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro (CEDEX, 2002; inédito)
- Balanç de sediment del tram final del riu Ebre (ACA, 2009)
- Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja (Flumen, 2009). Este estudio incluye una batimetría de Ribarroja realizada en 2007
- Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2011)
- Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008 (Tragsatec, 2012). Este estudio incluye una batimetría del embalse de Mequinenza realizada por la empresa EcoHydros en 2008
- Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2012)
- Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del Tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix (Universidad Politécnica de Madrid, 2018)

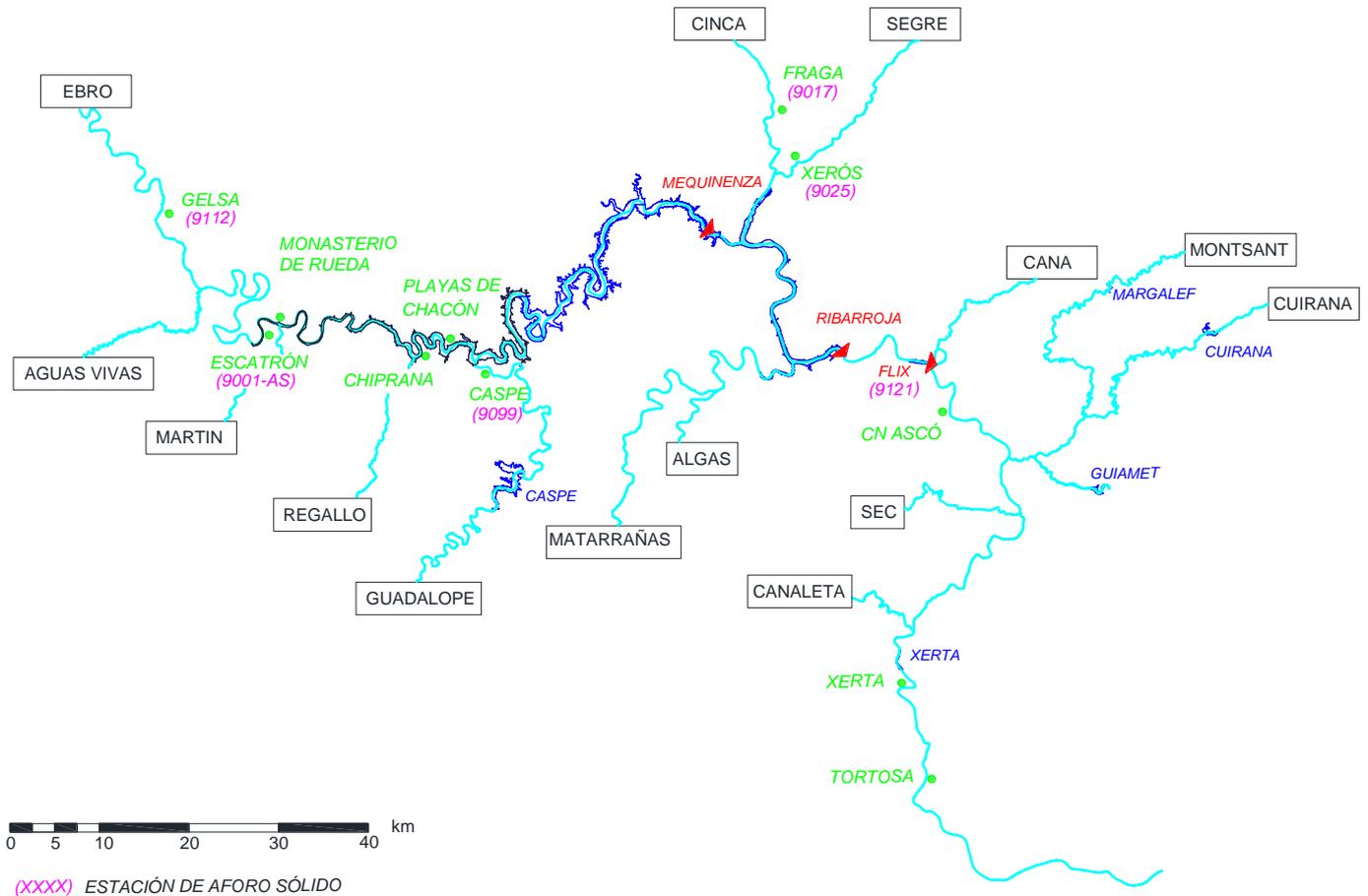
De la relación de los anteriores estudios, los que mayor valor tienen para la caracterización de los sedimentos en el bajo Ebro y en el entorno de los embalses de Mequinenza y Ribarroja son los que incluyen estudios batimétricos.

En cualquier caso, en los siguientes apartados se resumen los principales contenidos de todos estos trabajos

Además de estos estudios técnicos, durante los últimos 50 años la comunidad científica ha realizado un gran número de publicaciones en revistas técnicas y de

presentaciones en congresos científicos en relación con el tránsito sedimentario en el bajo Ebro. Muchos de estos trabajos han sido tenidos en cuenta en el desarrollo de los anteriores estudios.

Por último, para un mejor seguimiento del contenido de este apartado (y de toda esta nota técnica) en el esquema de la figura adjunt se ha representado la ubicación de las principales infraestructuras, emplazamientos y cursos fluviales del entorno del bajo Ebro que intervienen en el presente estudio.



(XXXX) ESTACIÓN DE AFORO SÓLIDO

Figura 1. Esquema de la zona de estudio. del río Ebro. Incluye indicaciones de de los principales afluentes y embalses.

2.2. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-octubre de 1970 (CEDEX, 1971)

Este estudio realizado por el CEDEX tras los primeros años de puesta en servicio del embalse de Mequinenza tenía como fin evaluar su capacidad. Para ello se realizó un vuelo fotogramétrico y una batimetría con sonar, con la que se obtuvieron perfiles transversales. La figura 2 muestra los tramos que se emplearon para su cubicación. La capacidad obtenida con el embalse a la cota 121.15 msnm fue de 1565.91 hm³, frente a los 1530 hm³ de capacidad teórica.

En el presente trabajo se han agrupado algunos de estos tramos en un total de 51. La tabla 1 indica la longitud de los tramos así como los volúmenes cubicados en el estudio batimétrico del CEDEX de 1970.



Figura 2. Tramificación del embalse de Mequenza

Tabla 1: Volumen de agua por tramos y acumulado con origen en la presa (1970)

Tramo	Longitud del tramo (m)	Distancia acumulada a la presa (km)	Volumen de agua del tramo (hm ³)	Volumen acumulado a la presa (hm ³)
T 1	2251.31	2.25	69.31	69.31
T 2	1857.72	4.11	38.08	107.39
T 3	1455.00	5.56	35.43	142.82
T 4	1750.48	7.31	33.93	176.75
T 5	2153.91	9.47	41.53	218.28
T 6	1159.15	10.63	21.86	240.14
T 7	2154.14	12.78	58.41	298.55
T 8	2101.45	14.88	87.78	386.34
T 9	1531.18	16.41	39.65	425.99
T 10	1479.17	17.89	39.07	465.05
T 11	1137.87	19.03	39.21	504.26
T 12	1828.36	20.86	56.07	560.33
T 13	2120.44	22.98	61.61	621.93
T 14	3922.63	26.90	100.24	722.17
T 15/16	2456.86	29.36	77.52	799.69
T 17	2678.23	32.04	65.15	864.84
T 18	1641.35	33.68	31.24	896.08
T 19	1659.47	35.34	42.08	938.16
T 20	1714.10	37.05	24.92	963.08
T 21	1827.12	38.88	31.64	994.71
T 22	504.41	39.38	12.75	1007.46
T 23	2320.64	41.70	79.79	1087.25
T 24	3024.48	44.73	24.50	1111.75
T 25	834.20	45.56	16.99	1128.74
T 26	3129.93	48.69	36.76	1165.49
T 27	889.71	49.58	14.89	1180.39
T 28	2487.05	52.07	37.30	1217.68
T 29	3790.85	55.86	36.75	1254.43
T 30	3300.35	59.16	28.44	1282.87
T 31	2227.86	61.39	22.66	1305.53
T 32	2021.53	63.41	20.45	1325.98
T 33	2582.55	65.99	28.40	1354.38
T 34	2308.18	68.30	28.49	1382.87
T 35	1334.15	69.64	11.42	1394.29



Tramo	Longitud del tramo (m)	Distancia acumulada a la presa (km)	Volumen de agua del tramo (hm ³)	Volumen acumulado a la presa (hm ³)
T 36	2574.30	72.21	17.39	1411.68
T 37	2562.69	74.77	20.32	1432.00
T 38	1814.13	76.59	19.73	1451.73
T 39	2518.03	79.10	10.62	1462.35
T 40	1054.19	80.16	7.13	1469.48
T 41	2800.80	82.96	12.83	1482.32
T 42	3458.04	86.42	23.42	1505.74
T 43	1430.42	87.85	7.36	1513.09
T 44	1931.25	89.78	7.33	1520.43
T 45	1487.49	91.27	5.33	1525.76
T 46	1559.81	92.83	7.67	1533.43
T 47	2702.24	95.53	3.90	1537.33
T 48	7195.45	102.72	17.16	1554.49
T 49	1044.68	103.77	4.40	1558.90
T 50	2766.52	106.54	4.02	1562.92
T 51	1571.57	108.11	2.99	1565.91

2.3. Plan Indicativo de Usos del Dominio Público Litoral del Delta del Ebro (Dirección General de Costas, 1978)

El Plan Indicativo de Usos del Dominio Público Litoral del Delta del Ebro, PIDU (1978) analiza la evolución histórica del Delta del Ebro estimando asimismo la carga de sedimentos totales del río Ebro. La tabla adjunta proporciona un orden de magnitud del transporte sólido desde la antigüedad.

Tabla 2: Evolución histórica de la tasa de sedimento en la desembocadura del Ebro

Período	Transporte sólido (Mt/año)
1960-1977	3
1800-1960	20
1600-1800	22
1200-1600	16
1-1200	3
A.C	3

2.4. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (CEDEX, 1982)

Los trabajos de campo de este nuevo estudio consistieron en un vuelo fotogramétrico y un levantamiento batimétrico con sonar, que permitieron restituir las curvas de nivel del vaso. Estas curvas fueron digitalizadas posteriormente y se dispone de ellas en formato vectorial (figura 3). En este trabajo se estimó que la sedimentación acumulada en el período 1966-1982 fue de 92 hm³.

Para facilitar el análisis comparativo, que se mostrará posteriormente en el apartado 3 de esta nota, se ha cubicado la capacidad de los mismos tramos indicados en la figura 2. La tabla 3 muestra el resultado de esta cubicación. Se aprecia que la capacidad de embalse a la cota 121.15 msnm es de 1387.87 hm³.

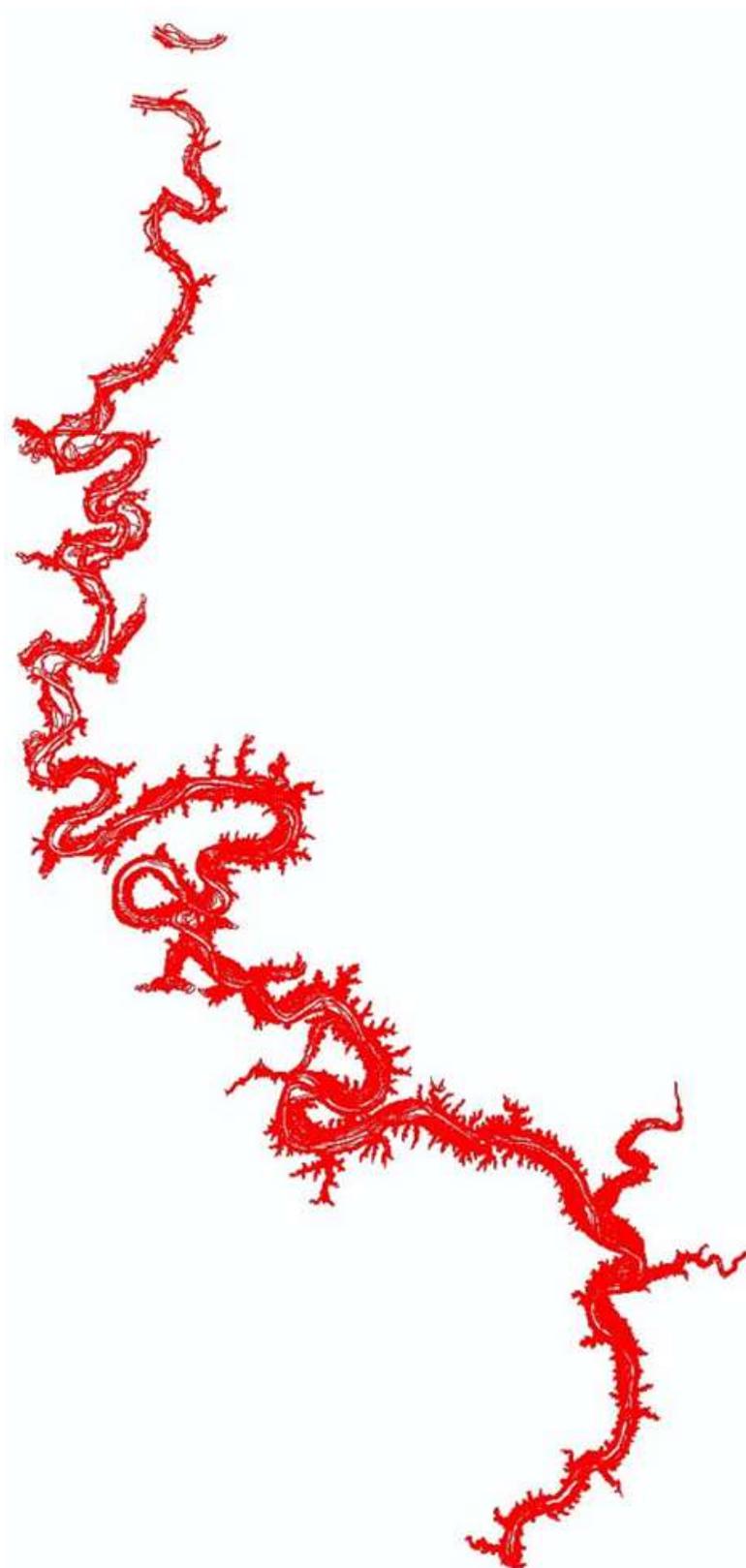


Figura 3. Curvas de nivel de la batimetría CEDEX del embalse de Mequinenza (1982)



Tabla 3: Volumen de agua por tramos y acumulado con origen en la presa. (1982)

Tramo	Longitud del tramo (m)	Distancia acumulada a la presa (km)	Volumen de agua del tramo 1982 (hm ³)	Volumen de agua acumulado a la presa 1982 (hm ³)
T 1	2251.31	2.25	53.39	53.39
T 2	1857.72	4.11	42.57	95.96
T 3	1455.00	5.56	34.60	130.56
T 4	1750.48	7.31	37.59	168.15
T 5	2153.91	9.47	54.16	222.31
T 6	1159.15	10.63	27.34	249.65
T 7	2154.14	12.78	63.82	313.47
T 8	2101.45	14.88	76.33	389.80
T 9	1531.18	16.41	33.76	423.56
T 10	1479.17	17.89	34.89	458.45
T 11	1137.87	19.03	29.72	488.18
T 12	1828.36	20.86	42.40	530.58
T 13	2120.44	22.98	47.90	578.47
T 14	3922.63	26.90	91.81	670.28
T 15/6	2456.86	29.36	57.34	727.62
T 17	2678.23	32.04	42.27	769.90
T 18	1641.35	33.68	32.90	802.80
T 19	1659.47	35.34	28.94	831.74
T 20	1714.10	37.05	29.66	861.40
T 21	1827.12	38.88	27.44	888.84
T 22	504.41	39.38	13.11	901.95
T 23	2320.64	41.70	70.85	972.81
T 24	3024.48	44.73	33.30	1006.10
T 25	834.20	45.56	9.70	1015.81
T 26	3129.93	48.69	39.72	1055.53
T 27	889.71	49.58	12.84	1068.37
T 28	2487.05	52.07	31.27	1099.64
T 29	3790.85	55.86	40.84	1140.48
T 30	3300.35	59.16	30.27	1170.74
T 31	2227.86	61.39	18.66	1189.40
T 32	2021.53	63.41	17.56	1206.96
T 33	2582.55	65.99	25.15	1232.12
T 34	2308.18	68.30	21.25	1253.36
T 35	1334.15	69.64	12.20	1265.56
T 36	2574.30	72.21	15.59	1281.15
T 37	2562.69	74.77	15.35	1296.49
T 38	1814.13	76.59	14.81	1311.30
T 39	2518.03	79.10	10.64	1321.94
T 40	1054.19	80.16	3.90	1325.85
T 41	2800.80	82.96	10.55	1336.40
T 42	3458.04	86.42	14.07	1350.47
T 43	1430.42	87.85	4.89	1355.36
T 44	1931.25	89.78	5.58	1360.94
T 45	1487.49	91.27	4.16	1365.10
T 46	1559.81	92.83	3.70	1368.80
T 47	2702.24	95.53	5.50	1374.30
T 48	7195.45	102.72	6.82	1381.12
T 49	1044.68	103.77	2.10	1383.22
T 50	2766.52	106.54	3.43	1386.65
T 51	1571.57	108.11	1.22	1387.87



2.5. El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro (CEDEX, 2002; inédito)

En el marco de la Documentación Técnica elaborada para la realización del Plan Hidrológico Nacional, el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX redactó en 2002 el documento “El medio ambiente hídrico en el delta del Ebro” en el cual se estudiaron los aportes sólidos al Delta del Ebro, entre otros aspectos. Este estudio contiene aportaciones propias que son relevantes para el presente trabajo. Al ser un documento interno de carácter inédito, se transcribe el apartado de “Aportes Sólidos en el Delta” en el Anexo 1 de esta nota para facilitar su consulta.

En este documento se realiza una revisión bibliográfica, que ha servido de base para elaborar la figura A1 del Anexo 1, que pone de manifiesto la reducción de los caudales líquido y sólido en curso bajo del río Ebro con el incremento de la capacidad de embalse de la cuenca.

También hace una estimación de los aportes sólidos del río tanto en la situación natural o de referencia y en la situación actual con los embalses existentes en la cuenca, mediante dos procedimientos. En primer lugar, analizando los registros batimétricos de sedimentación de los embalses y, en segundo lugar, de los registros de aforos sólidos.

Del primero de los análisis se concluye que se han producido aterramientos significativos en todos los embalses de la cuenca. Y que en la situación real (con embalses), en Mequinenza los aterramientos casi alcanzan los 7 Mt/año, mientras que los que recibe el embalse de Ribarroja, y que provienen fundamentalmente de la cuenca no controlada del Segre, son del orden de 1,35 Mt/año. Finalmente estima los aportes en Tortosa en unos 0,2 Mt/año. Además indica que en los embalses donde se ha realizado estudios sedimentológicos, el porcentaje de arenas es inferior al 10 % en la mayoría de los embalses.

Partiendo de los registros de sedimentación de los embalses obtiene un mapa de aportes sólidos por unidad de superficie (toneladas/ha/año) generados en la cuenca del Ebro (figura A2 del Anexo 1). Esto permite calcular que en la situación de referencia sin embalses la aportación de sedimentos al delta del Ebro sería de 14 Mt/año, de los que 9 Mt/año corresponderían a la cuenca del Ebro en el punto en donde se sitúa el embalse de Mequinenza y del orden de 5 Mt/año a la cuenca del Segre. Los aportes generados por unidad de superficie en la cuenca del Segre serían por tanto más del doble de los generados en la cuenca del Ebro vertiente a Mequinenza, lo tiene su explicación en la mayor magnitud de las crecidas del Segre en comparación a las del resto de la cuenca.

Como resultado del análisis realizado con aforos sólidos, se concluye que con carácter general proporciona valores muy inferiores a los obtenidos a partir de las batimetrías. Mientras que los sólidos en suspensión en el Ebro y en el Segre son por este procedimiento del orden de 0,8 y 0,4 Mt/año. De acuerdo con este documento la causa de esta reside en que las campañas de aforo no se realizan durante los episodios de avenida, donde las cargas de sedimento son mucho mayores.



2.6. Aplicación de tecnologías acústicas en la detección y evaluación de poblaciones de peces y mejillón cebrá en los embalses de la cuenca del Ebro” (ECOHYDROS, 2008)

Los trabajos realizados en el marco de este estudio ambiental proporcionaron una nueva batimetría del embalse de Mequinenza. Se dispone de la trayectoria seguida por el dispositivo sonar, recorriendo los límites del embalse y una serie de transeptos. Esta información se ha tratado mediante técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), y se ha comprobado que el volumen de embalse que reproduce es poco representativo por lo que en adelante se descarta el uso de esta información.

2.7. Balance de sedimentos del tramo final del río Ebro (ACA, 2009)

Este estudio, realizado por la Agencia Catalana del Agua, corresponde al período hidrológico de 2007/08. Durante este período se realizó una campaña de aforos, con múltiples tomas de muestras tanto de arrastre de fondo como de sedimentos en suspensión. La sección de aforo fue el Puente del Estado de Tortosa. Se realizaron muestreos mensuales de sedimentos con caudales bajos y también semuestreó durante la avenida de finales de mayo de 2008, con una punta algo superior a 2000 m³/s. Como resultado, este estudio se estimó el transporte de sedimentos de este periodo en 0,133 Mt/año, de los que el 89% correspondieron a transporte en suspensión. El 90 % del transporte se concentró en los meses mayo y junio.

En este informe se establece el umbral de inicio de arrastre de sedimento de fondo en 630 m³/s. El diámetro característico del material de arrastre de fondo es de 9 mm, con predominio de gravas. El 99.5 % de las 12857 toneladas de material de fondo aforado ese año se movilizó entre meses de mayo y junio.

2.8. Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja (Grupo Flumen, 2009)

Este estudio realizado por el Grupo Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña, analizó en detalle el transporte de sedimentos en el entorno del embalse de Ribarroja en el periodo comprendido entre el 25/11/1997 y el 19/09/1999. Desde un punto de vista de aportación de caudales, este periodo puede considerarse moderadamente seco tanto para el río Ebro como para el Cinca y el Segre. Solo se presentó una avenida (diciembre de 1997), que puede calificarse de moderada: caudales medio diarios de 1423 m³/s en el Ebro, 890 m³/s en el Cinca y 974 m³/s en el Segre. Las principales conclusiones alcanzadas fueron:

1. Los embalses de Mequinenza y Ribarroja retienen la totalidad del transporte de fondo y la mayor parte del transporte sólido en suspensión, estimando el transporte de fondo en la entrada al embalse de Mequinenza el representa menos del 1% de los sedimentos aportados por el Ebro.



2. En el embalse de Mequinenza, a lo largo del periodo estudiado, se depositó el 95,4% de las 1.400.000t de sólidos en suspensión que entraron. La concentración media a la entrada fue de 96 mg/l mientras que a la salida fue de 5.9 mg/l
3. En dicho período de casi 22 meses se almacenaron 510.000 toneladas de sedimento aportado por transporte en suspensión. La retención en Ribarroja fue del 40,7%, debido a que el tiempo de residencia en el embalse de Ribarroja es notablemente más corto que en el de Mequinenza, especialmente durante las crecidas cuando el aporte sólido es mayor. Las concentraciones medias fueron:
 - a. En el Ebro a la salida de Mequinenza : 5,9 mg/l en el Ebro a la salida de Mequinenza,
 - b. En el Segre en Serós: 45,3 mg/l
 - c. En el Cinca en Fraga: 262 mg/l
 - d. En el Ebro a la salida de Ribarroja: 19 mg/l.
4. La mayor parte de la aportación sólida en suspensión a los embalses (y por tanto también su retención) se produce durante las crecidas. En el periodo estudiado, el 50% de la retención total se produjo en el 7% del total de días en Mequinenza y en el 3% en Ribarroja.
5. En los embalses se incrementa la carga orgánica de los sedimentos en suspensión.
6. De acuerdo con la batimetría realizada entre finales de octubre y principios de noviembre de 2007, el volumen de sedimento en el embalse de Ribarroja se acota ente 13 y 16,6 hm³. Aproximadamente 5 hm³ de sedimentos (un 30% del total) se sitúan en los 5 primeros kilómetros de embalse y otro tercio se sitúa en torno a la desembocadura del Matarraña.
7. En la mayor parte del embalse, el sedimento es de textura limo-arcillosa, con un tamaño medio de partículas inferior a 25 micras. Excepcionalmente, en las zonas litorales, en el frente anterior de la lengua de sedimento procedente del río Segre y en una pequeña área de la zona de meandros, se observa un incremento de la proporción de arena en detrimento de la de limos, determinando un tamaño medio de partículas que varía entre 45 y 100 micras.

2.9. Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2011)

En el marco de este estudio de Control de Obra Civil para la CHE se realizó una campaña de 10 sondeos y 27 catas, entre los PK 74 al 94, medidos por el eje del río Ebro con origen en la presa de Mequinenza. La figura 7 muestra la ubicación de los puntos donde se realizó la prospección.

Esta información ha sido de gran utilidad para poder realizar la caracterización del sedimento de la cola del embalse de Mequinenza, que se presenta en el apartado 3.6.

Partiendo de las columnas estratigráficas de los sondeos se ha elaborado la tabla 4 que resume el resultado de los sondeos y facilita su análisis.

Se aprecia en todos los casos una primera capa de arenas y limos y fangos sobre una capa de gravas que debe corresponderse con el cauce natural. No se dispone de curvas granulométricas que permitan determinar el tamaño de las arenas y las gravas.



Figura 4. Situación en planta de las catas y sondeos

Tabla 4: Resumen de las columnas estratigráficas de los sondeos

Sondeo	PK	Margen	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4
1	90	Dcha	8.0 m limos arenosos, arenas.	0.4 m gravas	--	--
2	88	Dcha	0.2 m limos	1.0 m gravas	7.7 m arenas fangosas	0.6 m gravas
3	85	Dcha	10.0 m limos arenosos y arenas	0.2 m gravas		
4	82	Izq	4.0 m arenas, arenas fangosas y areniscas			
5	80	Izq	11.5 m de limos, limos fangosos y areniscas			
6	79	Izq	3.0 m de limos	0.2 m gravas	5.8 m limos fangosos y arenas	
7	77	Izq	5.0 m arenas, limos arenosos, arenas fangosas y arenas limosas			
8	76	Izq	4.2 m de limos y arenas fangosas	0.4 m gravas		
9	75	Izq	1.8 m de tierra vegetal	0.4 m gravas		
10	74	Izq	10.3 m de arenas, arenas fangosas y arenas muy saturadas.	0.4 m gravas		

2.10. Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008 (Tragsatec, 2012)

Este estudio evaluó el volumen de sedimentos existentes en el año 2008 por comparación de los perfiles obtenidos en el estudio de Ecohidros de 2008 y de la situación inicial de acuerdo con la topografía del vaso del estudio topográfico del IGN de 1961. De acuerdo con este análisis se calculó un volumen de sedimentos de 133 hm³.

2.11. Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2012)

Se trata de un trabajo encargado por la CHE, que complementa los estudios anteriores realizados por Ecohidros (2008), Control de Obra Civil (2011) y Tragsatec (2012). En el momento de la realización de ese estudio, el nivel del embalse se encontraba a la cota 100.5 msnm, dejando emergido los últimos 55 km del embalse. Esto permitió realizar una nivelación de precisión del tramo, con la que se ha podido generar una topografía con curvas de nivel vectorizadas (figura 6). Con el fin de establecer un escenario de comparación se digitalizó la topografía de 1961 (figura 5), aunque solamente se vectorizó el tramo final del embalse. Con cada una de estas geometrías se generó un MDT y por diferencia se obtuvo el volumen de sedimento en la cola del embalse. Para completar la cubicación del sedimento se empleó la batimetría de Ecohidros de 2008. Este trabajo arroja un volumen de sedimentos en el embalse de Mequinenza de 76.8 hm³, con el reparto espacial que se indica en la figura 10.

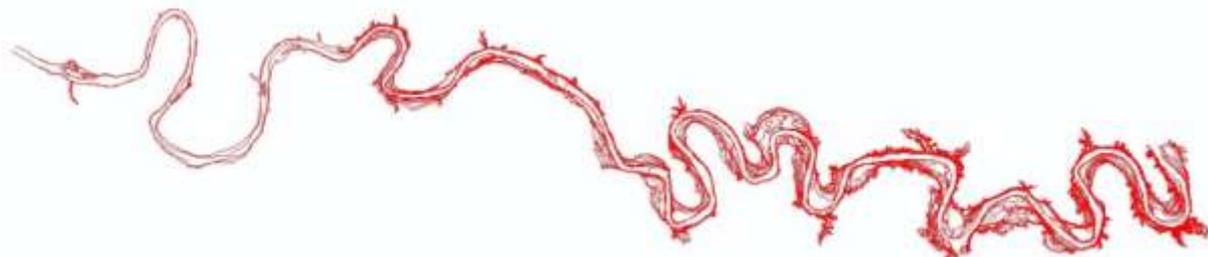


Figura 5. Curvas de nivel de la cola del embalse de Mequinenza en 1961

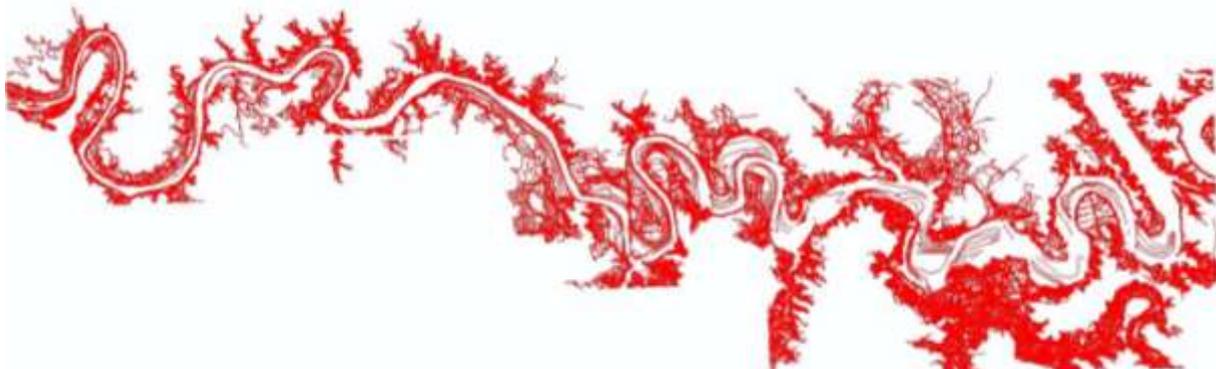


Figura 6. Curvas de nivel de la cola del embalse de Mequinenza en 2012

Este estudio hace además, una descripción del tipo de sedimento y de su reparto a lo largo del eje del embalse. Comenzando el recorrido desde la cola, hay un tramo con poca sedimentación debido a que las oscilaciones del nivel de embalse permiten que el sedimento se arrastre durante los episodios de avenida. Del PK 100 al 90 comienza a detectarse más sedimento en el cauce aunque de poca entidad. Posteriormente hay una zona en los que se produce la mayor acumulación del sedimentos, desde el PK 90 a 45, especialmente entre Chiprana (PK 80) y la desembocadura del Guadalope (PK57). Destaca la acumulación de sedimentos que se produce entono al PK 50 manteniéndose en niveles de sedimentación más bajos hasta la presa. (Figura 7).

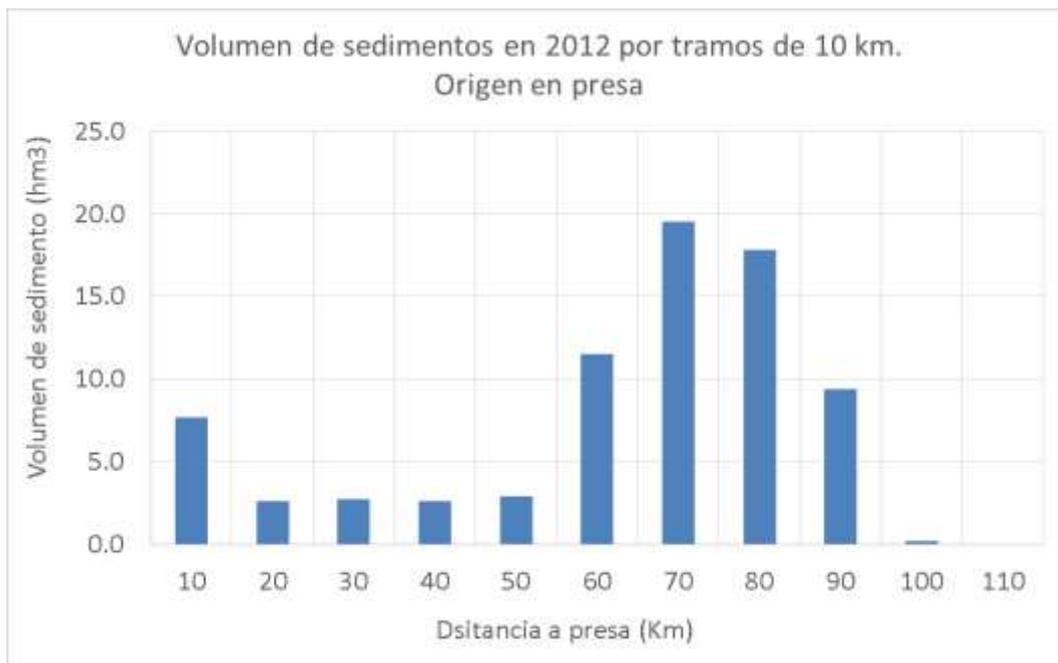


Figura 7. Reparto del sedimento en el embalse de Mequinenza en 2012. Elaborado con los datos del estudio de Control de obras (2012)

En 1969 se proyectó un paso de barcas para conectar las dos orillas a 2 km aguas abajo de la población de Chiprana. La sedimentación lo hizo inviable obligando finalmente a construir un puente que se proyectó en 1975. El estudio de Control de Obras de 2012 incluye las referencias al proyecto del puente de Chiprana (figura 8), entre las que se incluyen los sondeos realizados en 1975. La figura 9 muestra el plano de planta de ubicación de los sondeos y la figura 10 presenta las columnas estratigráficas obtenidas, donde se incluye el sondeo 6 realizado en 2011.

El análisis de estos sondeos indica que desde el llenado del embalse en 1966 hasta 1975 se produjo una sedimentación de limos con un espesor variable entre 2.5 y 7.5 m a lo largo de la sección transversal. Debajo de esa capa de limos se aprecia una estrato de gravas de 1mm de espesor en los sondeos 1, 2, 3 y 5 y de más de 7 m en el cauce principal (sondeo 4). El sondeo 5 del proyecto del puente se sitúa muy cerca del sondeo 6 del estudio de 2011 y muestra que ya en 1975 había 7.5 m de limos y en 2011 había del orden de 7 m. Es decir, que desde entonces se mantiene la sedimentación en la zona de Chiprana.



Figura 8. Puente de Chiprana. Fuente: Google Maps

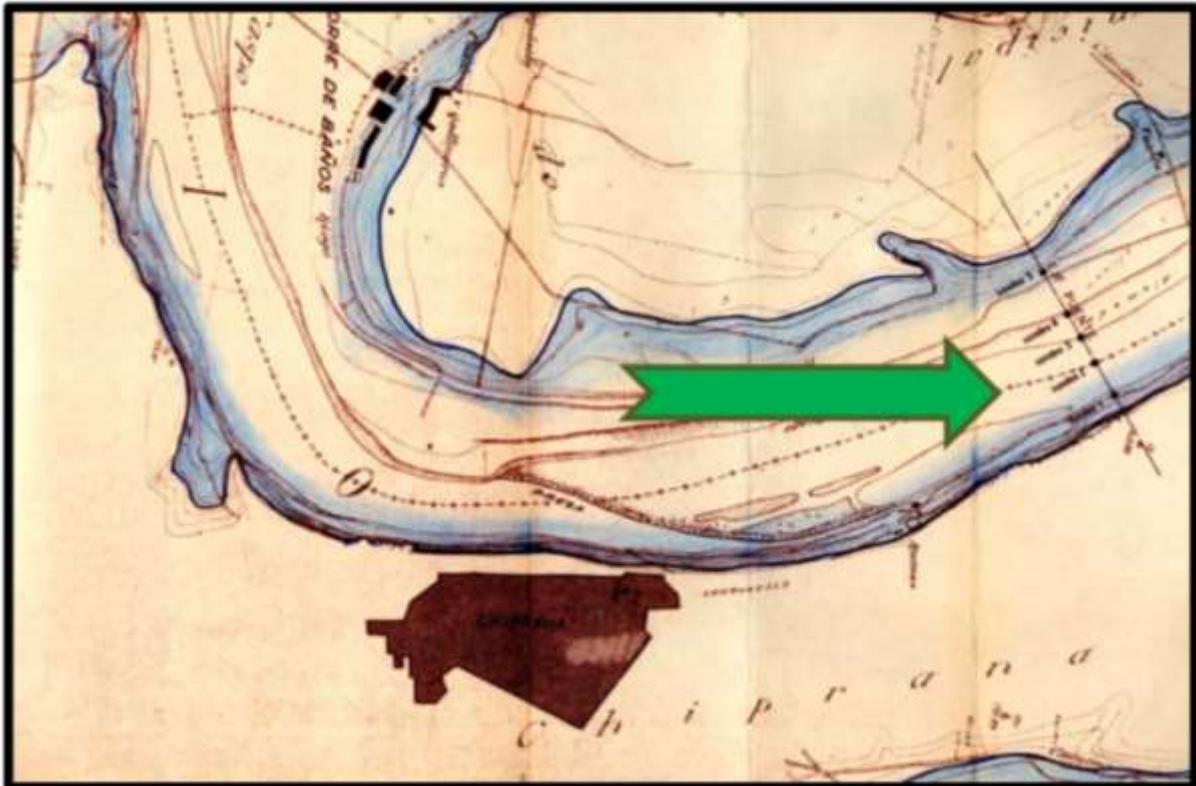


Figura 9. Indicación de los sondeos realizados para el proyecto del puente de Chiprana

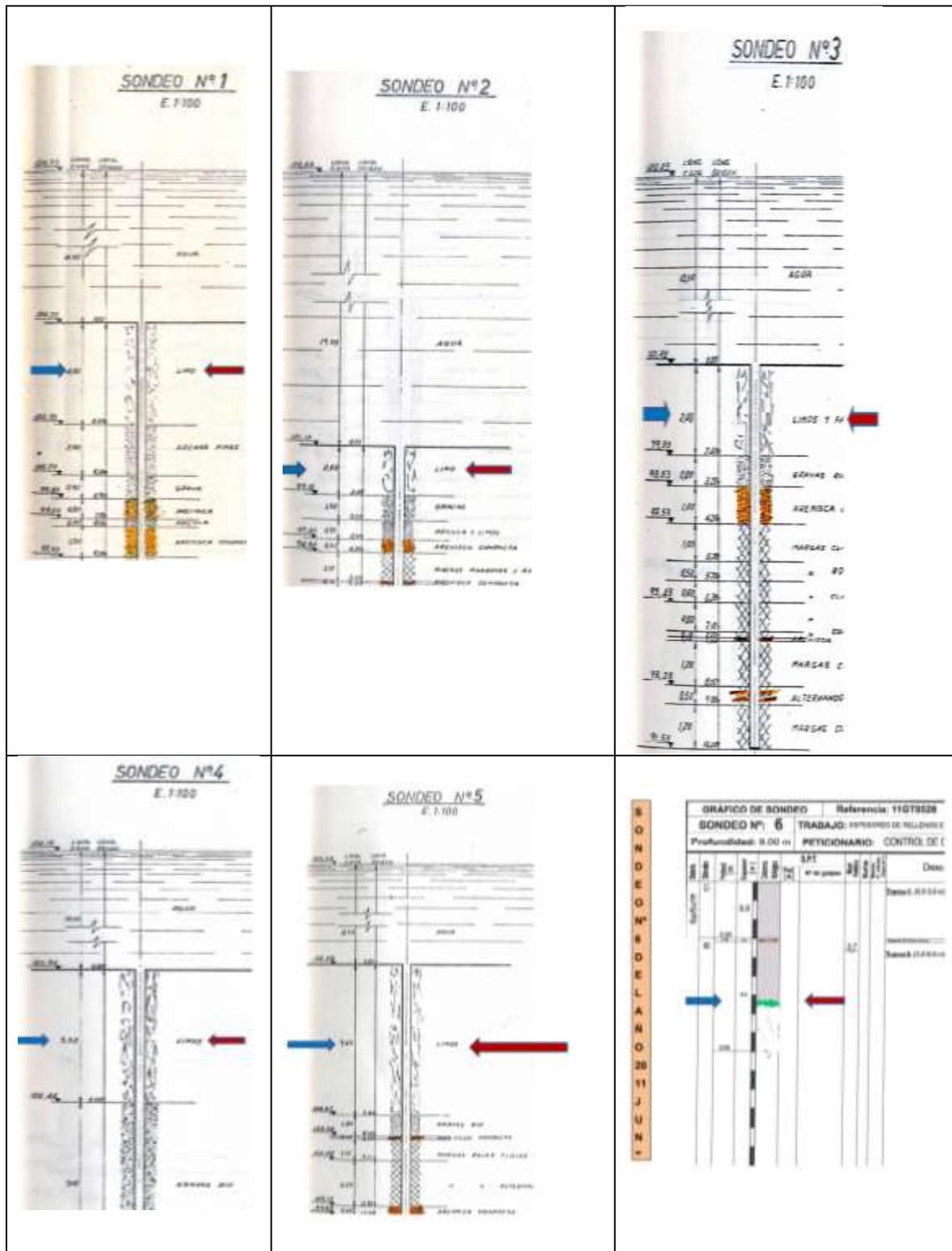


Figura 10. Sondeos realizados para el proyecto del puente de Chiprana



2.12. Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix (Universidad Politécnica de Madrid, 2018)

El objeto del estudio fue analizar las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix mediante la integración de los datos de sedimentos acumulados y las características del flujo hidrológico que se dan en estos en estos embalses.

Este estudio hace una revisión exhaustiva de la literatura técnica sobre el sedimento y la información hidrológica del sistema de embalses MRF, con el fin de caracterizar el flujo sedimentario en el mismo. Así mismo revisa las experiencias de movilización de sedimentos a nivel internacional, para finalmente analizar las posibilidades reales de movilización del sedimento.

Las conclusiones fundamentales de este estudio son:

- En la actualidad este flujo se ha reducido de manera considerable, tanto aguas arriba como aguas abajo de los embalses del sistema MRF. Las entradas al sistema están en torno a 1 Mt/a, que es menos de la décima parte del flujo inicial.
- La mayor parte de los sedimentos (80%) entran al sistema por el río Ebro. El río Cinca aporta un 15% del total y el resto de la cuenca del Segre, otro 5%. Se estima que Mequinenza retiene el 95% del sedimento en suspensión y Ribarroja el 40%.
- La carga media anual aguas abajo de las presas es inferior a 0,5 Mt/a, con el 60% transportado en suspensión y el 40% como carga de fondo. Según los investigadores, la mayor parte de este material procede de la erosión en el lecho del propio río.
- El sedimento acumulado en Mequinenza se encuentra en el rango comprendido entre 75 hm³ y 100 hm³, lo que supone entre un 5% y un 6,5% de su capacidad original. La acumulación en Ribarroja es de unos 13,1 hm³, un 4,5% de su capacidad original.
- Las únicas alternativas técnicamente viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema MRF son la retirada mecánica mediante excavación en seco o dragado (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix).

2.13. Resumen y conclusiones

De la revisión de los estudios incluidos en los anteriores apartados puede concluirse, en primer lugar que, por diferentes motivos, entre los que pueden destacarse factores climáticos o los usos del suelo de la cuenca, el río Ebro fué en el pasado un río hidromorfológicamente muy activo, con una gran carga de sedimentos que generó la formación deltaica de su desembocadura. Hay estimaciones del transporte de



sedimentos en la desembocadura del Ebro de finales del siglo XIX, que lo evalúan (Gorría, 1877) en 25 Mt/año. Sin embargo, la evolución de estos mismos factores, y la acción antrópica, ha ido reduciendo este transporte. Bayerri (1935) estimó el transporte entre 15 y 20 Mt/año en Tortosa a principios de Siglo XX. Catalán (1969) estima esta carga con mediciones en el período (1961-1963) en 2 Mt/año. Esta reducción de transporte se hace notar en la evolución del Delta, por ejemplo, el mapa topográfico de 1950 muestra un ligero retroceso del cabo de Tortosa.

El transporte de sedimento en suspensión se produce de manera continua por el cauce, aunque con mayores concentraciones en situaciones de avenida. Sin embargo, el transporte de fondo que es el que configura hidromorfológicamente el cauce, se produce únicamente durante los episodios de avenida. Se estima que entre 80 y 95% de la carga de sedimento que transporta el río es material fino (arcillas y limos) en suspensión, y entre el 5 y el 15% arena y grava. (Lechuga y López, 1997).

En la actualidad existen en la cuenca del Ebro más de 100 embalses (de más de 1 hm³) con una capacidad total que supera los 7.500 hm³. Por tanto, el régimen de caudales del río se encuentra muy modulado y el efecto barrera de los embalses hace que el transporte de sedimento se vea muy reducido en el curso bajo del Ebro.

Los embalses que más alteración generan en el curso bajo son los de Mequinenza (1964-66) y Ribarroja (1958-67). La influencia de Flix (1945-48) es mucho menor al estar situado aguas abajo de ellos y tener una capacidad muy reducida.

Muchos de los estudios consultados incluyen estudios o información sobre el volumen de sedimentos acumulados en los embalses de Mequinenza y Ribarroja, estimándose que, en la actualidad, estas acumulaciones de sedimentos oscilan entre las horquillas de 80 a 150 hm³ y de 13 a 19 hm³ para el primero y el segundo, respectivamente.

Sanz y otros (2001) evidencian el cambio de comportamiento hidromorfológico del cauce aguas abajo del complejo Mequinenza-Ribarroja-Flix (MRF), antes y después de su construcción. La avenida del 29 de octubre de 1937 con un caudal de 10.000 m³/s generó una importante transformación hidromorfológica del cauce movilizándolo y transformando barras aguas arriba de la desembocadura del río Ciurana. En esta avenida se produjo el cambio de orientación de la desembocadura del Ebro hacia el Norte que dio lugar a la involución del cabo de Tortosa. Las fotografías aéreas de 1982, 1987 y 1997, muestran como las avenidas posteriores a la construcción de los embalses han erosionado el tramo de cauce comprendido entre el embalse de Flix y la incorporación del río Ciurana, perdiéndose las barras y rectificando su trazado, dando inicio al proceso de acorazamiento del lecho. Además se aprecia un incremento significativo de la vegetación en el cauce como consecuencia de la falta de movilidad del sedimento.

Serra y otros (1990) estudiaron la evolución y las características sedimentarias del río Ebro entre Tortosa y Amposta en el período de tiempo 1983- 1988 detectando ya el acorazamiento del cauce próximo a la desembocadura.

El transporte de sedimentos aguas abajo de los embalses se ha reducido considerablemente. Palanques (1987) lo sitúa en torno a 0.15 Mt/año en la desembocadura, en el período 1983-86. Guillén (1992) obtuvo en el período 1988-89, 0.12 Mt/año. Tena (2012) con mediciones de sonda de turbidez obtuvo una tasa de 0.166 Mt/año para el período 1998-2008, tasa que se reduce a 0.066 Mt/año para el período 2008-2012, según Tena y Batalla (2013). Hay algunos estudios que incluyen



valores algo superiores, de manera que el tránsito sedimentario en el curso bajo del Ebro podría acotarse en la actualidad, de acuerdo con diferentes autores, en una horquilla que iría de 0,15 a 0,50 Mt/año.



3. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE MEQUINENZA

3.1. Introducción

En este apartado se incluyen los estudios realizados por el CEDEX en el marco de la tarea 2.1, conforme a lo indicado en el capítulo 1 de esta nota técnica, para actualizar la estimación del volumen de sedimento retenido actualmente en 2020 en el embalse de Mequinenza, así como para caracterizar el tipo de sedimento existente.

La estimación del volumen de sedimentos en la actualidad en el embalse se ha realizado por dos procedimientos (extrapolando la tendencia de las tasas anuales de sedimentación obtenidas en la cola del embalse anteriores a 2012 y mediante una correlación del régimen hidrológico) y se ha calculado tanto el volumen total de sedimentos depositado en el embalse, como el acumulado en los 42 km de su cola. Previamente, se han estimado también los volúmenes de sedimentos acumulados en 1982 y en 2012 y se ha reevaluado la capacidad inicial del embalse en el momento de su puesta en servicio.

Para ello se ha utilizado la información topográfica y batimétrica que se detalla a continuación:

1. Salto de Mequinenza: Concesión aprovechamiento del río Ebro y afluente (Expediente CHE1957-A60). Se puede tomar como terreno natural de referencia el correspondiente a la topografía realizada en 1961 en este trabajo que utilizó el levantamiento topográfico a escala 1:5.000 de toda la zona del embalse apoyado en una triangulación general realizada por el Instituto Geográfico Nacional. La CHE ha facilitado al CEDEX esta topografía escaneada en alta resolución y las curvas de nivel del tramo final del embalse, vectorizadas para el estudio de 2012. En el marco del actual estudio se ha completado la vectorización de las curvas de nivel de todo el embalse para poder comparar con los volúmenes obtenidos con las demás batimetrías y poder cuantificar con precisión el volumen de sedimentación (figura 14).
2. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (1970) CEH (CEDEX).
3. Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (1982) CEH (CEDEX).
4. Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza (2012) Control de Obras.

3.2. Reevaluación de la capacidad inicial del embalse de Mequinenza

Partiendo de las curvas de nivel vectorizadas (figura 11), se ha generado un Modelo Digital del Terreno (MDT), que ha permitido cubicar la capacidad del embalse hasta la

cota 121.15 msnm. El resultado de esta cubicación indica que el volumen inicial del embalse era de 1483.29 hm³, frente a los 1530 hm³ teóricos. Las técnicas empleadas hoy en día, con Sistemas de Información Geográfica, permiten realizar estos cálculos con una precisión mucho mayor que hace 50 años, por lo que se empleará en este estudio como capacidad inicial de referencia 1483,29 hm³, que corresponde al momento de puesta en servicio del embalse en 1966. En este estudio se toma esta fecha como punto de partida de los procesos de sedimentación del embalse y esta geometría de referencia para el cálculo de la sedimentación en los diferentes escenarios temporales.

Para facilitar el análisis y comparación de las diferentes batimetrías, se ha calculado el volumen de embalse por tramos, según la sectorización empleada por el CEDEX para su cubicación en 1971 (figura 2), agrupados en 51 tramos. El tramo 16 corresponde a una rama lateral del vaso y se ha agrupado para este análisis con el tramo 15. La tabla 5 presenta la cubicación obtenida en cada tramo y que servirá para analizar la sedimentación de forma espacialmente distribuida.

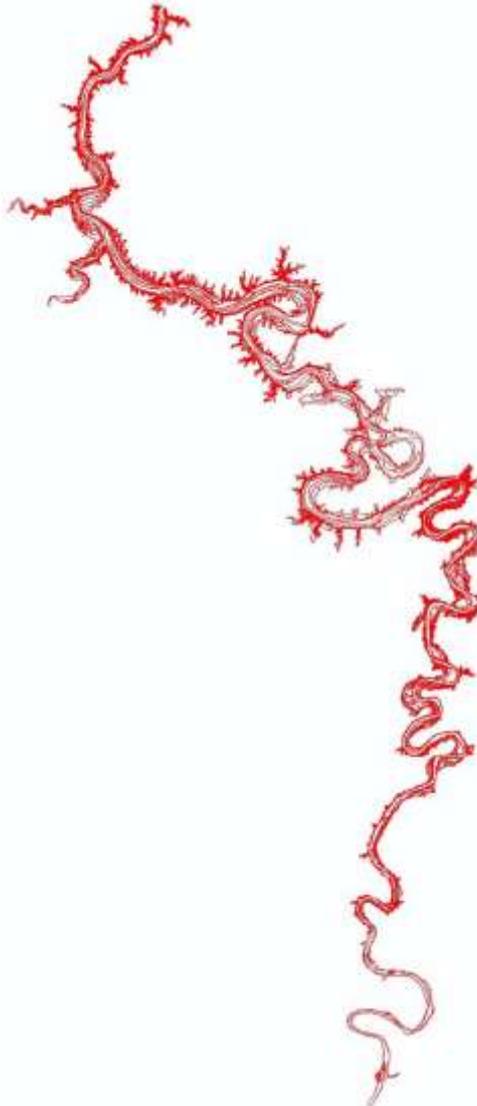


Figura 11. Batimetría original del embalse de Mequinenza en situación de puesta en explotación en 1966



Tabla 5: Volumen de agua por tramos y acumulado con origen en la presa (1966)

Tramo	Longitud del tramo (m)	Distancia acumulada a la presa (km)	Volumen de agua del tramo (hm ³)	Volumen acumulado a la presa (hm ³)
T 1	2251.31	2.25	57.45	57.45
T 2	1857.72	4.11	44.35	101.80
T 3	1455.00	5.56	35.87	137.67
T 4	1750.48	7.31	38.67	176.34
T 5	2153.91	9.47	53.52	229.86
T 6	1159.15	10.63	27.93	257.79
T 7	2154.14	12.78	66.31	324.10
T 8	2101.45	14.88	80.51	404.61
T 9	1531.18	16.41	34.66	439.27
T 10	1479.17	17.89	35.02	474.30
T 11	1137.87	19.03	35.02	509.32
T 12	1828.36	20.86	44.22	553.54
T 13	2120.44	22.98	50.09	603.63
T 14	3922.63	26.90	96.60	700.23
T 15/16	2456.86	29.36	57.43	757.66
T 17	2678.23	32.04	43.50	801.16
T 18	1641.35	33.68	33.10	834.26
T 19	1659.47	35.34	30.43	864.68
T 20	1714.10	37.05	31.43	896.12
T 21	1827.12	38.88	28.40	924.51
T 22	504.41	39.38	14.14	938.66
T 23	2320.64	41.70	75.68	1014.34
T 24	3024.48	44.73	36.23	1050.57
T 25	834.20	45.56	11.26	1061.83
T 26	3129.93	48.69	44.34	1106.17
T 27	889.71	49.58	14.29	1120.46
T 28	2487.05	52.07	32.96	1153.42
T 29	3790.85	55.86	44.55	1197.97
T 30	3300.35	59.16	31.99	1229.96
T 31	2227.86	61.39	19.32	1249.28
T 32	2021.53	63.41	18.88	1268.16
T 33	2582.55	65.99	27.98	1296.14
T 34	2308.18	68.30	23.70	1319.84
T 35	1334.15	69.64	15.87	1335.71
T 36	2574.30	72.21	17.44	1353.15
T 37	2562.69	74.77	17.41	1370.56
T 38	1814.13	76.59	16.02	1386.58
T 39	2518.03	79.10	12.22	1398.80
T 40	1054.19	80.16	4.26	1403.06
T 41	2800.80	82.96	12.74	1415.80
T 42	3458.04	86.42	17.27	1433.07
T 43	1430.42	87.85	5.61	1438.68
T 44	1931.25	89.78	7.83	1446.52
T 45	1487.49	91.27	5.03	1451.54
T 46	1559.81	92.83	4.53	1456.08
T 47	2702.24	95.53	6.67	1462.75
T 48	7195.45	102.72	13.79	1476.54
T 49	1044.68	103.77	2.10	1478.64
T 50	2766.52	106.54	3.43	1482.07
T 51	1571.57	108.11	1.22	1483.29

3.3. Estimación del volumen de sedimento acumulado hasta 1982

Las tablas 1 y 3 muestran la cubicación por tramos resultante de las batimetrías del CEDEX de 1970 y 1982. La figura 12 muestra la capacidad de embalse acumulada con origen en la presa en los tres escenarios temporales: 1966 que corresponde a la situación inicial, 1970 y 1982, tras 4 y 16 años respectivamente desde la puesta en explotación.

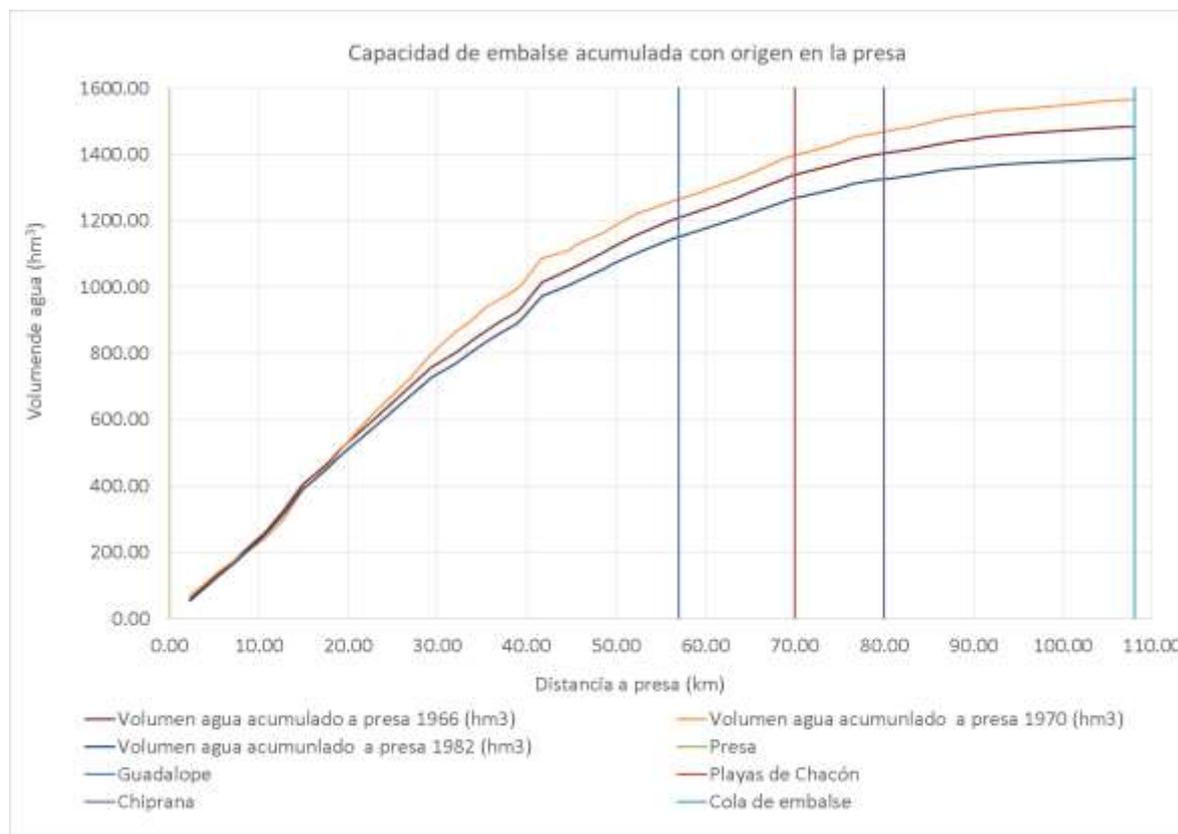


Figura 12. Capacidad de embalse acumulada con origen en la presa en 1966, 1970, y 1982

La batimetría de 1970 proporciona una capacidad de embalse de 1565.91 hm³, 82.62 hm³ superior a la inicialmente estimada, a partir de la topografía de 1961, en 1483.29 hm³. Esta discrepancia de un 5.6%, está asociada, por un lado, a la precisión de los medios técnicos disponibles cuando se realizaron tales trabajos y por otro, a la metodología empleada para el cálculo de los volúmenes. En el reconocimiento batimétrico de 1970 se obtuvieron perfiles transversales, cubicando los volúmenes por tramos, lo que puede introducir un error bastante grande en un embalse de 108 km de largo con una geometría tan compleja.

La tabla 6 presenta los valores de sedimento retenido en 1982 en cada uno de los tramos de embalse, partiendo de la topografía de 1961 y de la batimetría de 1970. Dichos valores se grafican en la figuras 13 y 14. Se incluyen en estas gráficas las referencias de la presa en el PK 0, de la incorporación del Guadalope PK 57, Playas de Chacón PK 70, Chiprana PK 80 y la cola del embalse en el azud del Monasterio de Rueda.

Los valores de sedimentación obtenidos a partir del reconocimiento batimétrico de 1970 de la figura 13 presentan una gran dispersión de los valores de la sedimentación,



proporcionando tramos con grandes volúmenes de erosión y sedimentación difícilmente explicables, si no es por la falta de precisión en los perfiles obtenidos en el reconocimiento.

Tabla 6: Sedimento por tramos en 1982

Tramo	Distancia acumulada a la presa (km)	Volumen de sedimento del tramo 1966-1982 (hm ³)	Volumen de sedimento acumulado 1966-1982 (hm ³)	Volumen de sedimento del tramo 1970-1982 (hm ³)	Volumen de sedimento acumulado 1970-1982 (hm ³)
T 1	2.25	4.05	4.05	15.92	15.92
T 2	4.11	1.78	5.84	-4.49	11.43
T 3	5.56	1.27	7.11	0.83	12.26
T 4	7.31	1.08	8.19	-3.66	8.60
T 5	9.47	-0.64	7.55	-12.62	-4.02
T 6	10.63	0.59	8.14	-5.48	-9.51
T 7	12.78	2.49	10.63	-5.41	-14.92
T 8	14.88	4.19	14.81	11.46	-3.46
T 9	16.41	0.90	15.71	5.89	2.43
T 10	17.89	0.13	15.85	4.17	6.60
T 11	19.03	5.30	21.15	9.48	16.08
T 12	20.86	1.82	22.97	13.67	29.75
T 13	22.98	2.19	25.16	13.71	43.46
T 14	26.90	4.79	29.95	8.43	51.89
T 15/6	29.36	0.09	30.04	20.18	72.07
T 17	32.04	1.22	31.26	22.87	94.94
T 18	33.68	0.20	31.46	-1.66	93.28
T 19	35.34	1.49	32.95	13.14	106.42
T 20	37.05	1.78	34.72	-4.74	101.68
T 21	38.88	0.95	35.68	4.19	105.88
T 22	39.38	1.03	36.70	-0.37	105.51
T 23	41.70	4.83	41.53	8.94	114.45
T 24	44.73	2.94	44.47	-8.80	105.65
T 25	45.56	1.55	46.02	7.28	112.93
T 26	48.69	4.62	50.64	-2.96	109.97
T 27	49.58	1.45	52.08	2.05	112.01
T 28	52.07	1.70	53.78	6.03	118.04
T 29	55.86	3.72	57.50	-4.09	113.95
T 30	59.16	1.72	59.22	-1.83	112.13
T 31	61.39	0.66	59.88	4.00	116.13
T 32	63.41	1.32	61.19	2.89	119.02
T 33	65.99	2.83	64.02	3.25	122.27
T 34	68.30	2.45	66.47	7.24	129.51
T 35	69.64	3.67	70.15	-0.78	128.73
T 36	72.21	1.86	72.00	1.80	130.53
T 37	74.77	2.06	74.07	4.98	135.51
T 38	76.59	1.22	75.28	4.92	140.43
T 39	79.10	1.57	76.86	-0.02	140.41
T 40	80.16	0.36	77.22	3.23	143.64
T 41	82.96	2.19	79.40	2.28	145.91
T 42	86.42	3.20	82.60	9.36	155.27
T 43	87.85	0.72	83.32	2.46	157.73
T 44	89.78	2.25	85.57	1.75	159.48
T 45	91.27	0.87	86.44	1.17	160.66
T 46	92.83	0.83	87.28	3.97	164.63
T 47	95.53	1.17	88.45	-1.60	163.03
T 48	102.72	6.97	95.42	10.35	173.37
T 49	103.77	0.00	95.42	2.30	175.68
T 50	106.54	0.00	95.42	0.59	176.27
T 51	108.11	0.00	95.42	1.77	178.04

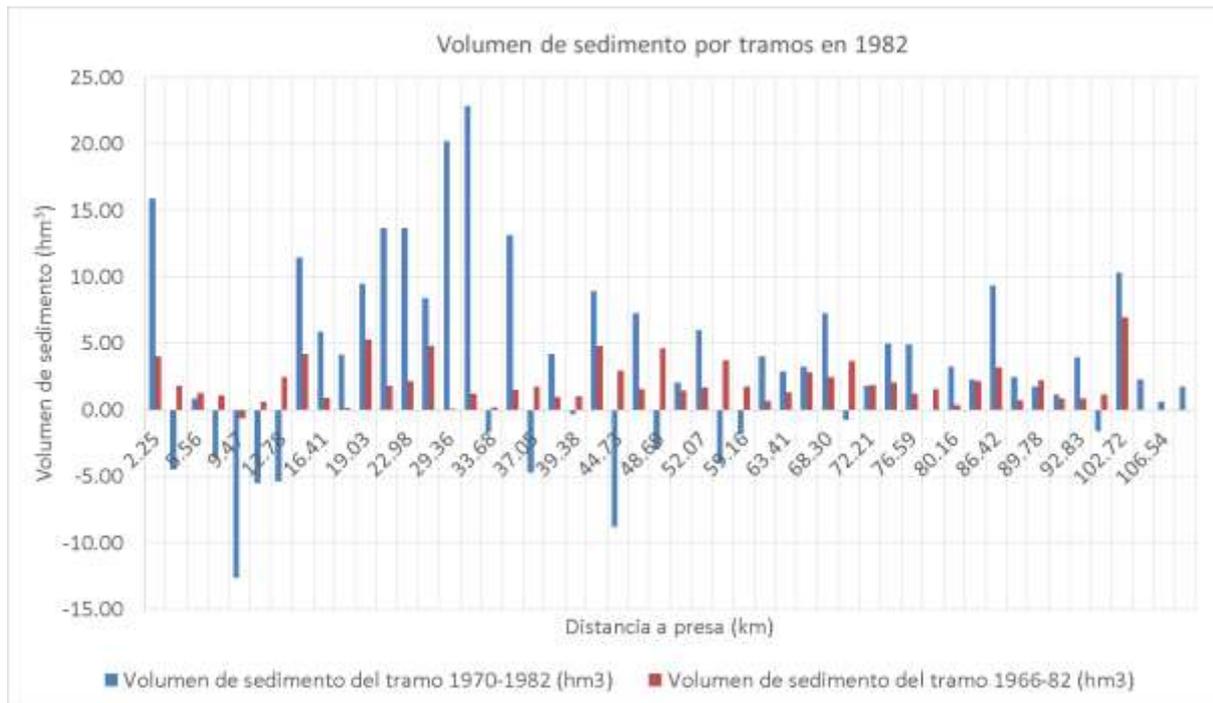


Figura 13: Volumen de sedimento por tramos (1982)

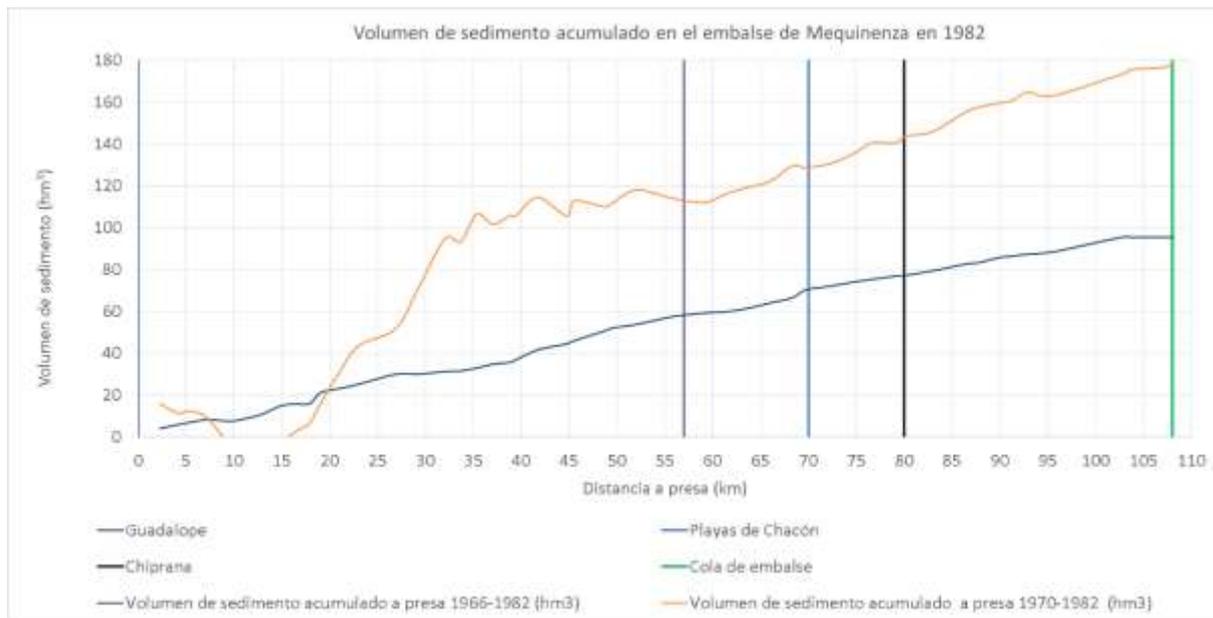


Figura 14: Volumen de sedimento acumulado con origen en la presa de Mequinenza (1982)

El volumen de sedimento con la batimetría de 1982 referido a la topografía de 1961, proporciona un volumen de sedimento de 95 hm³, lo que se corresponde con la valoración de sedimento que se obtuvo en el estudio de 1982. Sin embargo, este valor se duplica con la batimetría de 1970.

Por todas estas razones, se ha decidido no emplear en el presente estudio el reconocimiento batimétrico de 1970. Asimismo, se concluye que la calidad técnica de la metodología empleada para el reconocimiento batimétrico del CEDEX de 1982,



como la de la cartografía digital generada, permiten considerar adecuado el valor 95 hm³ de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza en 1982.

3.4. Estimación del volumen de sedimento acumulado hasta 2012

Además de las dos batimetrías completas del embalse, se dispone de la topografía parcial de la segunda mitad del embalse, en concreto desde la desembocadura del Guadalope al Ebro obtenida en el estudio de Control de Obras de 2012 (apartado 2.11). Esta topografía pudo obtenerse por técnicas convencionales gracias a que en 2012 quedó emergido la cola del embalse por encima de la cota 100.5 msnm, por lo que se supone de gran precisión. Partiendo de las curvas de nivel vectorizadas de la figura 6, se han obtenido los volúmenes de agua hasta la cota 121.15 msnm desde el tramo 30 (PK 59) hasta la cola del embalse, que se muestran en la tabla 7.

Tabla 7: Volumen de agua en los tramos finales de Mequinenza en 1969 y 2012

Tramo	Distancia a presa (km)	Capacidad del tramo 1966 (hm ³)	Capacidad acumulada a T-30 1966 (hm ³)	Capacidad del tramo 1982 (hm ³)	Capacidad acumulada a T-30 1982 (hm ³)	Capacidad del tramo 2012 (hm ³)	Capacidad acumulada a T-30 2012 (hm ³)
T 30	59.16	31.99	31.99	30.27	30.27	23.54	23.54
T 31	61.39	19.32	51.31	18.66	48.93	13.79	37.33
T 32	63.41	18.88	70.19	17.56	66.49	13.83	51.16
T 33	65.99	27.98	98.16	25.15	91.64	20.19	71.34
T 34	68.30	23.70	121.86	21.25	112.89	19.37	90.71
T 35	69.64	15.87	137.73	12.20	125.09	10.29	101.00
T 36	72.21	17.44	155.18	15.59	140.67	13.63	114.63
T 37	74.77	17.41	172.59	15.35	156.02	11.89	126.52
T 38	76.59	16.02	188.61	14.81	170.83	11.67	138.19
T 39	79.10	12.22	200.83	10.64	181.47	8.19	146.38
T 40	80.16	4.26	205.09	3.90	185.37	2.64	149.02
T 41	82.96	12.74	217.83	10.55	195.93	7.67	156.68
T 42	86.42	17.27	235.10	14.07	209.99	11.47	168.15
T 43	87.85	5.61	240.71	4.89	214.89	3.71	171.86
T 44	89.78	7.83	248.54	5.58	220.47	4.93	176.79
T 45	91.27	5.03	253.57	4.16	224.63	3.33	180.12
T 46	92.83	4.53	258.11	3.70	228.33	2.37	182.49
T 47	95.53	6.67	264.78	5.50	233.83	4.53	187.01
T 48	102.72	13.79	278.57	6.82	240.64	7.35	194.36
T 49	103.77	2.10	280.67	2.10	242.75	1.06	195.43
T 50	106.54	3.43	284.10	3.43	246.17	2.18	197.61
T 51	108.11	1.22	285.32	1.22	247.40	1.18	198.78

La figura 15 representa la capacidad acumulada, con origen en el tramo en los tres escenarios temporales. Por diferencia de la capacidad de cada tramo se ha calculado el volumen de sedimento acumulado en cada uno de ellos, en los intervalos temporales 1966-1982, 1982-2012 y 1966-2012. El resultado se muestra en la tabla 8 y figura 16.

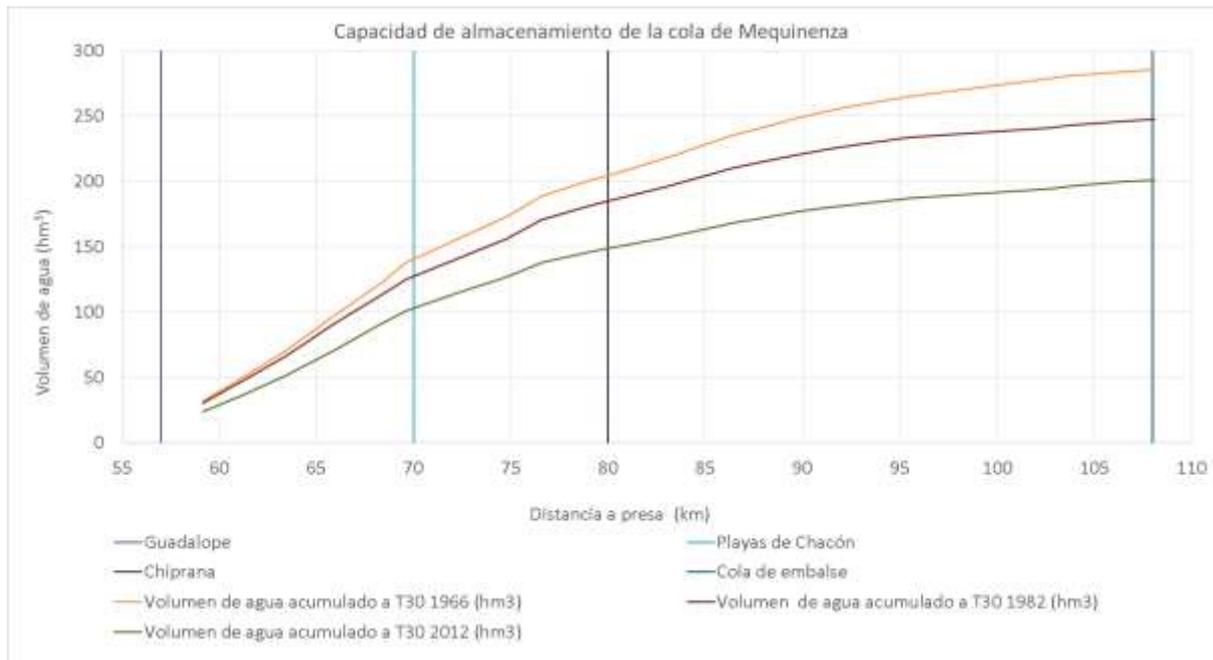


Figura 15. Evolución temporal de la capacidad de la cola del embalse de Mequenza

Tabla 8: Volumen de sedimento en los tramos finales de Mequenza en 1969, 1970, 1982 y 2012

Tramo	Distancia a la presa (km)	Volumen sedimento del tramo 1966-82 (hm³)	Volumen sedimento acumulado a T-30 1966-82 (hm³)	Volumen sedimento del tramo 1982-12 (hm³)	Volumen sedimento acumulado a T-30 1982-2012 (hm³)	Volumen sedimento del tramo 1966-2012 (hm³)	Volumen sedimento acumulado a T-30 1966-2012 (hm³)
T 30	59.16	1.72	1.72	6.73	6.73	8.45	8.45
T 31	61.39	0.66	2.38	4.87	11.60	5.53	13.98
T 32	63.41	1.32	3.70	3.73	15.33	5.05	19.03
T 33	65.99	2.83	6.52	4.96	20.30	7.79	26.82
T 34	68.30	2.45	8.98	1.88	22.17	4.33	31.15
T 35	69.64	3.67	12.65	1.91	24.08	5.58	36.73
T 36	72.21	1.86	14.51	1.96	26.04	3.82	40.55
T 37	74.77	2.06	16.57	3.45	29.50	5.52	46.07
T 38	76.59	1.22	17.79	3.14	32.64	4.36	50.42
T 39	79.10	1.57	19.36	2.45	35.09	4.03	54.45
T 40	80.16	0.36	19.72	1.27	36.35	1.62	56.07
T 41	82.96	2.19	21.91	2.89	39.24	5.07	61.15
T 42	86.42	3.20	25.11	2.60	41.84	5.80	66.95
T 43	87.85	0.72	25.83	1.18	43.02	1.90	68.85
T 44	89.78	2.25	28.08	0.65	43.67	2.90	71.75
T 45	91.27	0.87	28.95	0.83	44.51	1.70	73.45
T 46	92.83	0.83	29.78	1.33	45.84	2.17	75.62
T 47	95.53	1.17	30.95	0.98	46.82	2.15	77.77
T 48	102.72	6.97	37.92	-0.54	46.28	6.44	84.21
T 49	103.77	0.00	37.92	0.00	46.28	0.00	84.21
T 50	106.54	0.00	37.92	0.00	46.28	0.00	84.21
T 51	108.11	0.00	37.92	0.00	46.28	0.00	84.21

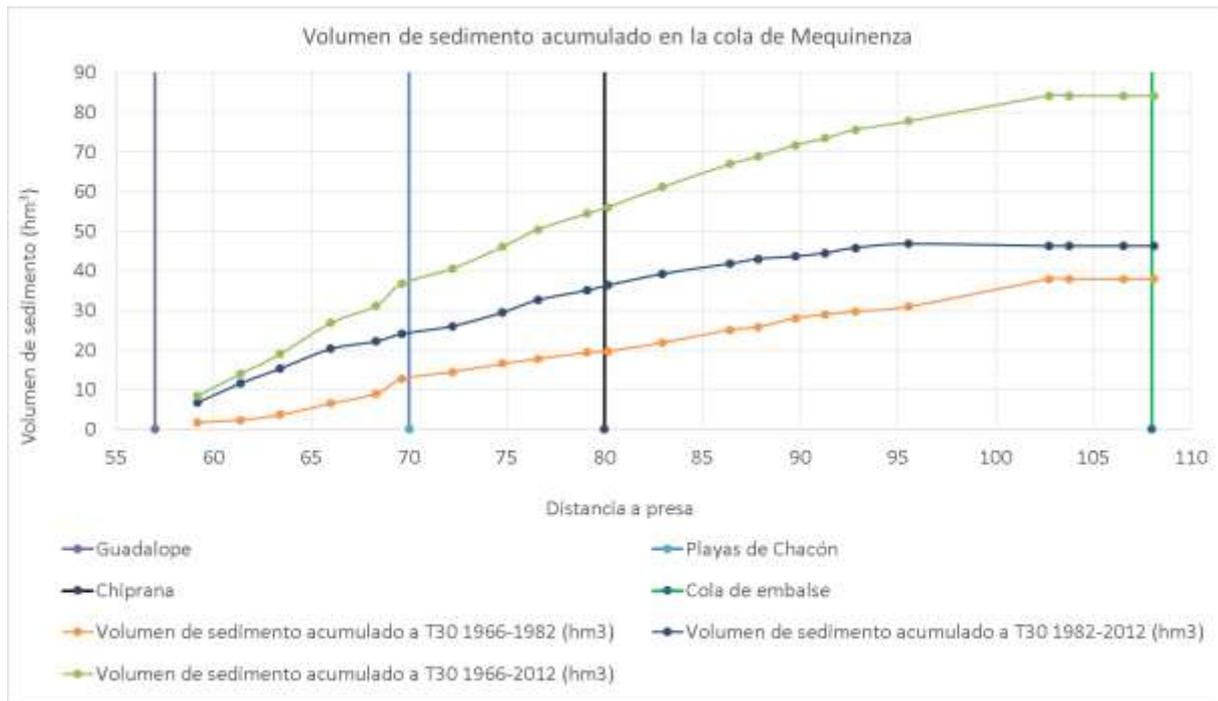


Figura 16. Sedimento acumulado en la cola del embalse de Mequienza en diferentes periodos

Se aprecia que en los últimos 42 km de la cola del embalse se acumularon 37.92 hm³ de sedimento hasta 1982 y otros 46.28 hm³ desde 1982 hasta 2012, totalizando 84.21 hm³.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos en el estudio de Control de Obras de 2012, se aprecia que existe un desajuste en el volumen de sedimentos. En aquel estudio se estimó que el volumen total de sedimentos en el embalse era 76.8 hm³, con el reparto indicado en la figura 7. Se ha calculado el volumen de sedimento empleando esa misma discretización espacial, y se ha generado la figura 17 para facilitar la comparación.

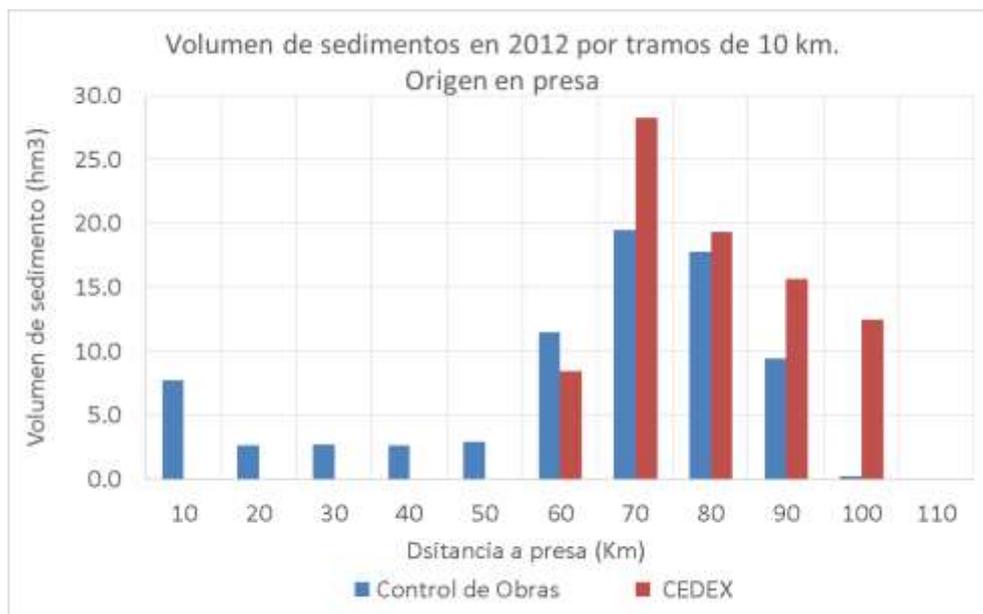


Figura 17. Comparación de la cubicación del sedimento en la cola del embalse de Mequienza.



Teniendo en cuenta que para hacer estos cálculos se ha empleado la misma información cartográfica, el desfase debe explicarse por el método empleado para la cubicación. En el trabajo de Control de Obras se indica que el volumen del sedimento de la cola se obtuvo por sustracción de los MDT generados a partir de las curvas de nivel obtenidas en 2012 y las vectorizadas de la topografía de 1961 (figuras 5 y 6). Es posible que un error en la georreferenciación de ambos MDT haya alterado el resultado real. En el actual estudio, para evitar que desajustes en la georreferenciación puedan afectar a los resultados, se han cubicado los volúmenes de agua hasta la cota 121.15 msnm, con ambos MDT y el volumen de sedimento se obtiene por la diferencia de capacidades. Esta operación se ha realizado de forma global en la cola y por tramos proporcionando resultados consistentes por ambos métodos. Por tanto, se considera más adecuada la estimación de 84.21 hm³ de sedimento almacenados en los últimos 42 km de embalse en 2012.

De acuerdo con estos resultados la tasa de sedimentación anual media en la cola del embalse del período 1966-1982 fue de 2.37 hm³/año, mientras que el segundo período (1982-2012) desciende a 1.54 (65.08%), lo que pone de manifiesto una reducción en la aportación de sedimento que llega al embalse.

Si la forma de explotación del embalse se mantiene en el tiempo, se puede suponer que los procesos hidrodinámicos y fisicoquímicos que afectan a la sedimentación en el embalse no se verán alterados, y por tanto si se produce una modificación de la tasa de aportes de sedimentos al embalse, es razonable suponer que esta variación afectará de forma lineal a la tasa de sedimentación de cada uno de los tramos en los que se ha dividido.

La tabla 9 muestra las tasas de sedimentación anual de cada uno de los tramos del embalse en el período 1966-1982 y las de los tramos de cola en el lapso 1982-2012. Aplicando la reducción observada de la tasa de sedimentación, obtenida para el tramo de cola, al resto de tramos se obtiene una aproximación de la tasa de sedimentación de los primeros tramos del embalse sin batimetría en el período 1982-2012. Estas tasas se resaltan en cursiva en la tabla 9. Con estas tasas se ha obtenido una estimación del sedimento en todo el embalse en 2012, que se muestran en la tabla 10.

Como resultado de estos cálculos se desprende que durante el período de 1982 a 2012, se depositaron en la cola del embalse de Mequinenza 42.28 hm³, y otros 73.97 hm³ en el resto del embalse, totalizando 116.25 hm³ en todo el período. Si acumulamos estos sedimentos a los 95 hm³ del periodo anterior a 1982, totalizan 211.87 hm³.

La figura 18 muestra la evolución temporal del sedimento en el embalse, acumulados con el origen en la presa, en 1982 y 2012.



Tabla 9: Tasa de sedimentación por tramos en 1982 y 2012

Tramo	Distancia acumulada a la presa (km)	Tasa de sedimentación anual del tramo 1966-1982 (hm ³)	Tasa de sedimentación anual del tramo 1982-2012 (hm ³)	Estimación de la tasa de sedimentación anual del tramo 1982-2012 (hm ³)
T 1	2.25	0.25	--	0.13
T 2	4.11	0.11	--	0.06
T 3	5.56	0.08	--	0.04
T 4	7.31	0.07	--	0.04
T 5	9.47	-0.04	--	-0.02
T 6	10.63	0.04	--	0.02
T 7	12.78	0.16	--	0.08
T 8	14.88	0.26	--	0.14
T 9	16.41	0.06	--	0.03
T 10	17.89	0.01	--	0.00
T 11	19.03	0.33	--	0.17
T 12	20.86	0.11	--	0.06
T 13	22.98	0.14	--	0.07
T 14	26.90	0.30	--	0.16
T 15/6	29.36	0.01	--	0.00
T 17	32.04	0.08	--	0.04
T 18	33.68	0.01	--	0.01
T 19	35.34	0.09	--	0.05
T 20	37.05	0.11	--	0.06
T 21	38.88	0.06	--	0.03
T 22	39.38	0.06	--	0.03
T 23	41.70	0.30	--	0.16
T 24	44.73	0.18	--	0.10
T 25	45.56	0.10	--	0.05
T 26	48.69	0.29	--	0.15
T 27	49.58	0.09	--	0.05
T 28	52.07	0.11	--	0.07
T 29	55.86	0.23	--	0.15
T 30	59.16	0.11	0.22	--
T 31	61.39	0.04	0.16	--
T 32	63.41	0.08	0.12	--
T 33	65.99	0.18	0.17	--
T 34	68.30	0.15	0.06	--
T 35	69.64	0.23	0.06	--
T 36	72.21	0.12	0.07	--
T 37	74.77	0.13	0.12	--
T 38	76.59	0.08	0.10	--
T 39	79.10	0.10	0.08	--
T 40	80.16	0.02	0.04	--
T 41	82.96	0.14	0.10	--
T 42	86.42	0.20	0.09	--
T 43	87.85	0.05	0.04	--
T 44	89.78	0.14	0.02	--
T 45	91.27	0.05	0.03	--
T 46	92.83	0.05	0.04	--
T 47	95.53	0.07	0.03	--
T 48	102.72	0.44	-0.02	--
T 49	103.77	0.00	0.00	--
T 50	106.54	0.00	0.00	--
T 51	108.11	0.00	0.00	--



Tabla 10: Sedimentación en el embalse de Mequenza en 2012

Tramo	Distancia acumulada a la presa (km)	Tasa de sedimentación anual del tramo 1982-2012 (hm ³)	Volumen de sedimentación del tramo 1982-2012 (hm ³)	Volumen de sedimento acumulado 1982-2012 (hm ³)	Volumen de sedimentación del tramo 1966-2012 (hm ³)	Volumen de sedimento acumulado 1966-2012 (hm ³)
T 1	2.25	0.31	4.95	4.95	9.00	9.00
T 2	4.11	0.14	2.18	7.12	3.96	12.96
T 3	5.56	0.10	1.55	8.68	2.82	15.79
T 4	7.31	0.08	1.32	9.99	2.40	18.19
T 5	9.47	-0.05	-0.78	9.22	-1.42	16.77
T 6	10.63	0.05	0.72	9.94	1.31	18.08
T 7	12.78	0.19	3.03	12.97	5.52	23.60
T 8	14.88	0.32	5.11	18.08	9.29	32.89
T 9	16.41	0.07	1.10	19.18	2.00	34.89
T 10	17.89	0.01	0.16	19.34	0.29	35.18
T 11	19.03	0.41	6.47	25.81	11.77	46.95
T 12	20.86	0.14	2.22	28.03	4.04	50.99
T 13	22.98	0.17	2.67	30.70	4.87	55.86
T 14	26.90	0.37	5.85	36.55	10.64	66.50
T 15/6	29.36	0.01	0.11	36.66	0.20	66.70
T 17	32.04	0.09	1.49	38.15	2.72	69.41
T 18	33.68	0.02	0.24	38.39	0.43	69.85
T 19	35.34	0.11	1.82	40.20	3.30	73.15
T 20	37.05	0.14	2.17	42.37	3.95	77.10
T 21	38.88	0.07	1.16	43.54	2.12	79.21
T 22	39.38	0.08	1.25	44.79	2.28	81.50
T 23	41.70	0.37	5.89	50.68	10.72	92.22
T 24	44.73	0.23	3.58	54.27	6.52	98.74
T 25	45.56	0.12	1.89	56.16	3.44	102.18
T 26	48.69	0.36	5.63	61.79	10.25	112.43
T 27	49.58	0.11	1.77	63.56	3.21	115.65
T 28	52.07	0.13	2.07	65.63	3.77	119.41
T 29	55.86	0.29	4.54	70.17	8.25	127.66
T 30	59.16	0.13	6.73	76.90	8.45	136.11
T 31	61.39	0.05	4.87	81.77	5.53	141.65
T 32	63.41	0.10	3.73	85.50	5.05	146.69
T 33	65.99	0.22	4.96	90.46	7.79	154.48
T 34	68.30	0.19	1.88	92.34	4.33	158.81
T 35	69.64	0.28	1.91	94.25	5.58	164.39
T 36	72.21	0.14	1.96	96.21	3.82	168.21
T 37	74.77	0.16	3.45	99.66	5.52	173.73
T 38	76.59	0.09	3.14	102.80	4.36	178.08
T 39	79.10	0.12	2.45	105.26	4.03	182.11
T 40	80.16	0.03	1.27	106.52	1.62	183.74
T 41	82.96	0.17	2.89	109.41	5.07	188.81
T 42	86.42	0.25	2.60	112.01	5.80	194.61
T 43	87.85	0.06	1.18	113.19	1.90	196.51
T 44	89.78	0.17	0.65	113.84	2.90	199.42
T 45	91.27	0.07	0.83	114.67	1.70	201.12
T 46	92.83	0.06	1.33	116.01	2.17	203.28
T 47	95.53	0.09	0.98	116.98	2.15	205.43
T 48	102.72	0.54	-0.54	116.45	6.44	211.87
T 49	103.77	0.00	0.00	116.45	0.00	211.87
T 50	106.54	0.00	0.00	116.45	0.00	211.87
T 51	108.11	0.00	0.00	116.45	0.00	211.87

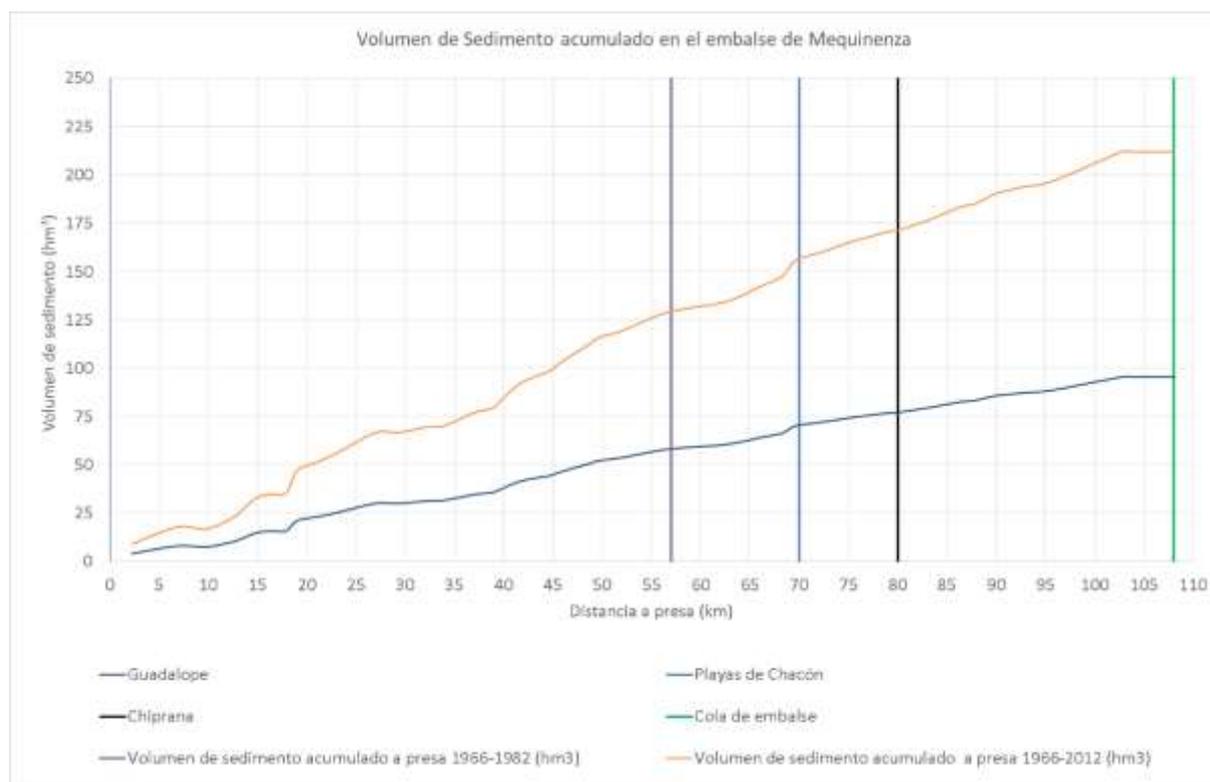


Figura 18. Evolución sedimentológica del embalse de Mequinenza en 1982 y 2012

Repartiendo linealmente el volumen de sedimentos en ambos períodos se obtiene que de 1966 a 1982 la aportación anual de sedimentos al embalse fue de 5.93 hm³/año, que con una densidad media del sedimento de 1126.36 kg/m³, resulta 6.68 Mt/año. Esta aportación media se reduce en el segundo período a 3.88 hm³/año, unos 4.37 Mt/año. Lógicamente estos valores son promediados y vendrán asociados los procesos de avenida ocurridos en ese período de tiempo. La tabla 11 muestra la clasificación de los caudales de entrada en Mequinenza en ambos períodos. La tabla indica el número de ocasiones en que se han producido avenidas con puntas dentro de los intervalos de caudal indicados. Se aprecia que en el segundo intervalo las avenidas han sido menos frecuentes, como consecuencia de la mayor regulación de la cuenca, lo que justifica el descenso de aportes de sedimentos registrados.

Tabla 11: Clasificación de caudales por períodos

Caudal (m ³ /s)	Caudales de entrada en Mequinenza	
	1966-1982	1983-2012
500-1000	285	222
1000-1500	52	51
1500-2000	28	14
2000-2500	4	1
2500-3000	2	0

3.5. Estimación del volumen de sedimento acumulado en 2020 por ajuste de la tasa de sedimentación

Teniendo en cuenta que el régimen hidrológico de la cuenca no se ha visto alterado desde 2012 hasta la actualidad, parece adecuado emplear las mismas tasas de sedimentación del periodo anterior. La tabla 12 muestra los volúmenes almacenados por tramos y acumulados a lo largo del embalse, que totaliza 242.92 hm³. La figura 19 muestra la evolución sedimentológica del embalse en los tres hitos temporales considerados, 1982, 2012 y 2020.

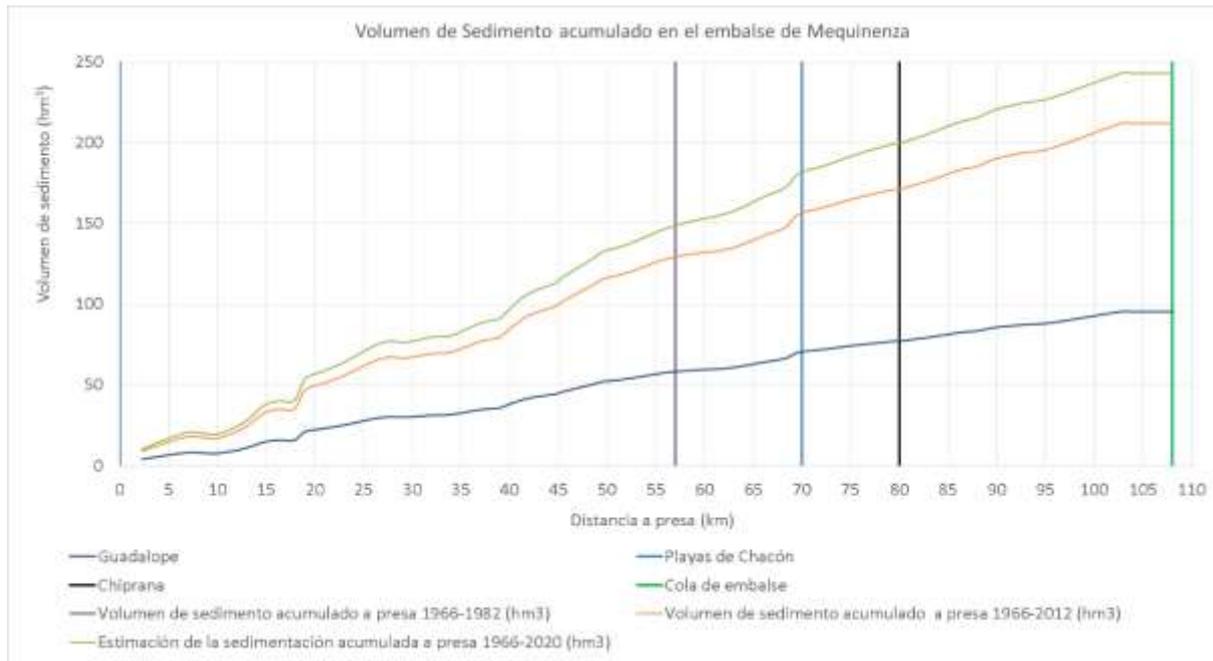


Figura 19: Evolución temporal de la sedimentación del embalse de Mequenza. Valores acumulados con origen en la presa

Tabla 12: Estimación de la sedimentación en el embalse de Mequenza en 2020

Tramo	Distancia acumulada a la presa (km)	Tasa de sedimentación anual del tramo 1982-2012 (hm ³)	Volumen de sedimentación del tramo 2012-2020 (hm ³)	Volumen de sedimentación del tramo 1966-2020 (hm ³)	Volumen de sedimento acumulado 1966-2020 (hm ³)
T 1	2.25	0.31	1.32	10.32	10.32
T 2	4.11	0.14	0.58	4.54	14.86
T 3	5.56	0.10	0.41	3.24	18.10
T 4	7.31	0.08	0.35	2.75	20.85
T 5	9.47	-0.05	-0.21	-1.63	19.22
T 6	10.63	0.05	0.19	1.51	20.73
T 7	12.78	0.19	0.81	6.33	27.06
T 8	14.88	0.32	1.36	10.66	37.71
T 9	16.41	0.07	0.29	2.29	40.01
T 10	17.89	0.01	0.04	0.33	40.34
T 11	19.03	0.41	1.72	13.49	53.83
T 12	20.86	0.14	0.59	4.63	58.46
T 13	22.98	0.17	0.71	5.58	64.04
T 14	26.90	0.37	1.56	12.20	76.24



Tramo	Distancia acumulada a la presa (km)	Tasa de sedimentación anual del tramo 1982-2012 (hm ³)	Volumen de sedimentación del tramo 2012-2020 (hm ³)	Volumen de sedimentación del tramo 1966-2020 (hm ³)	Volumen de sedimento acumulado 1966-2020 (hm ³)
T 15/6	29.36	0.01	0.03	0.23	76.47
T 17	32.04	0.09	0.40	3.11	79.59
T 18	33.68	0.02	0.06	0.50	80.08
T 19	35.34	0.11	0.48	3.79	83.87
T 20	37.05	0.14	0.58	4.52	88.40
T 21	38.88	0.07	0.31	2.43	90.82
T 22	39.38	0.08	0.33	2.62	93.44
T 23	41.70	0.37	1.57	12.29	105.73
T 24	44.73	0.23	0.96	7.48	113.21
T 25	45.56	0.12	0.50	3.95	117.16
T 26	48.69	0.36	1.50	11.75	128.91
T 27	49.58	0.11	0.47	3.69	132.59
T 28	52.07	0.13	0.55	4.32	136.91
T 29	55.86	0.29	1.21	9.46	146.37
T 30	59.16	0.13	1.80	10.25	156.62
T 31	61.39	0.05	1.30	6.83	163.45
T 32	63.41	0.10	0.99	6.04	169.49
T 33	65.99	0.22	1.32	9.11	178.61
T 34	68.30	0.19	0.50	4.83	183.44
T 35	69.64	0.28	0.51	6.09	189.53
T 36	72.21	0.14	0.52	4.34	193.87
T 37	74.77	0.16	0.92	6.44	200.31
T 38	76.59	0.09	0.84	5.19	205.50
T 39	79.10	0.12	0.65	4.68	210.18
T 40	80.16	0.03	0.34	1.96	212.14
T 41	82.96	0.17	0.77	5.85	217.99
T 42	86.42	0.25	0.69	6.49	224.48
T 43	87.85	0.06	0.32	2.22	226.70
T 44	89.78	0.17	0.17	3.08	229.77
T 45	91.27	0.07	0.22	1.92	231.70
T 46	92.83	0.06	0.36	2.52	234.22
T 47	95.53	0.09	0.26	2.41	236.62
T 48	102.72	0.54	-0.14	6.30	242.92
T 49	103.77	0.00	0.00	0.00	242.92
T 50	106.54	0.00	0.00	0.00	242.92
T 51	108.11	0.00	0.00	0.00	242.92

3.6. Estimación del volumen de sedimento acumulado en 2020 por ajustes hidrológicos

El anuario de aforos del CEDEX dispone de la serie de caudales diarios en la estación de Sástago, de código Indroea 9112, con datos desde 1945 hasta 1997. Para poder disponer de una serie completa desde 1966 hasta la actualidad, los técnicos de la CHE han generado una serie de caudales, partiendo de la serie de caudales desaguados y del nivel de embalse, esto ha permitido completar esta parte del estudio.

La figura 20 muestra la serie de caudales medios diarios desde 1966 hasta la actualidad. Tal y como se comentó anteriormente, se aprecia un descenso de los caudales punta en avenidas. La pendiente de la línea correspondiente al ajuste lineal presenta una pendiente negativa de 6.2 litros/s/día.

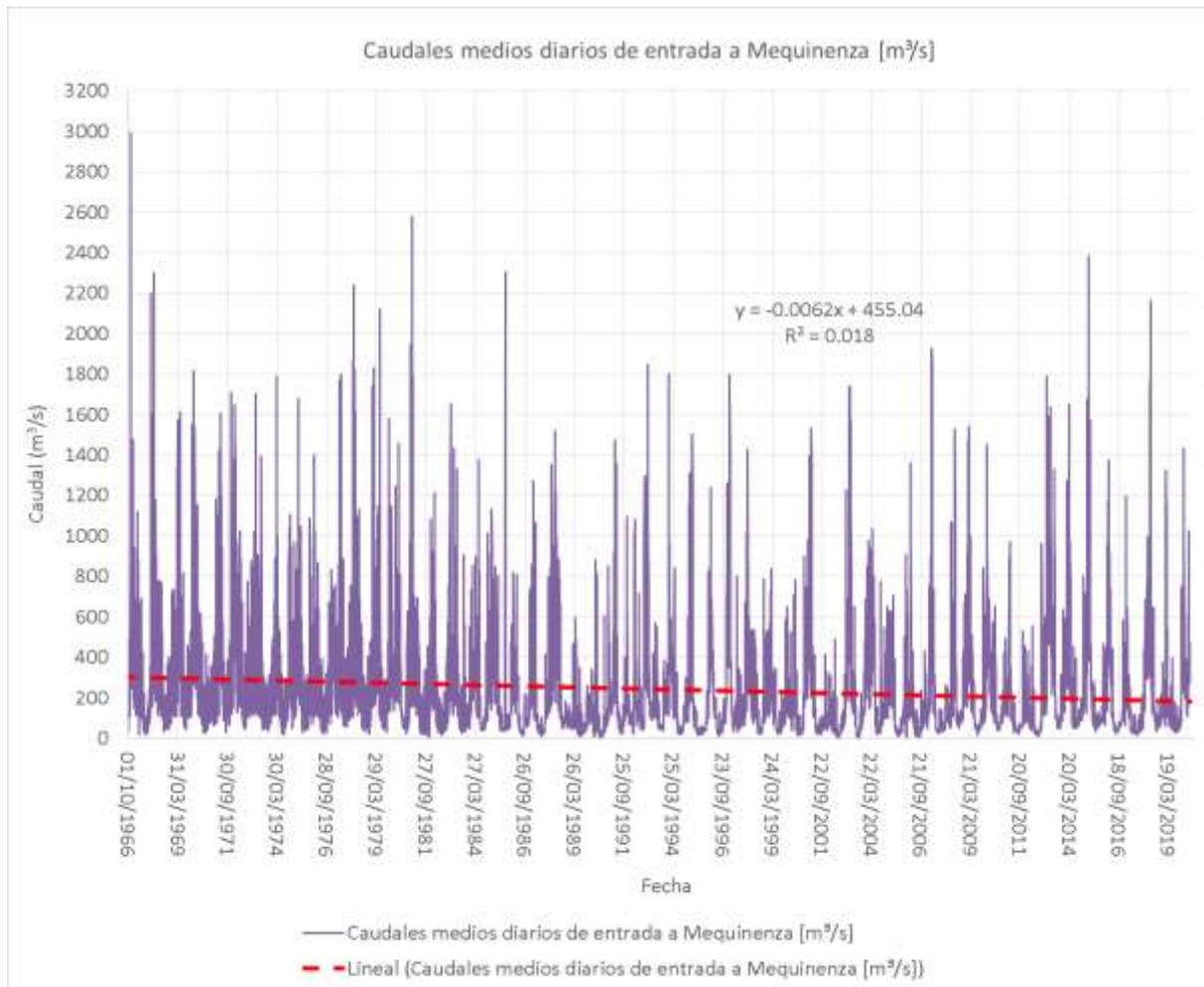


Figura 20. Serie histórica de cadules de entrada en el embalse de Mequenza

El caudal medio de la serie desde 1966, hasta la actualidad, es de 21.1 hm³/día. La figuras 21 y 22 presentan la aportación en acumulada en hm³, referida al caudal medio. Se aprecia un cambio de pendiente de la ley de aportaciones acumuladas en torno a 1982, precisamente. El caudal medio de aportación del período 1966-1982 fué de 27.2 hm³/día (figura 21), mientras que en el período 1985-2020 es de 17.7 hm³/día (figura 22). Este cambio puede deberse a cambios de los usos del suelo, a una mayor regulación de la cuenca, o incluso a fenómenos de cambio climático. En cualquier caso, el análisis de las causas excede el ámbito de este estudio.

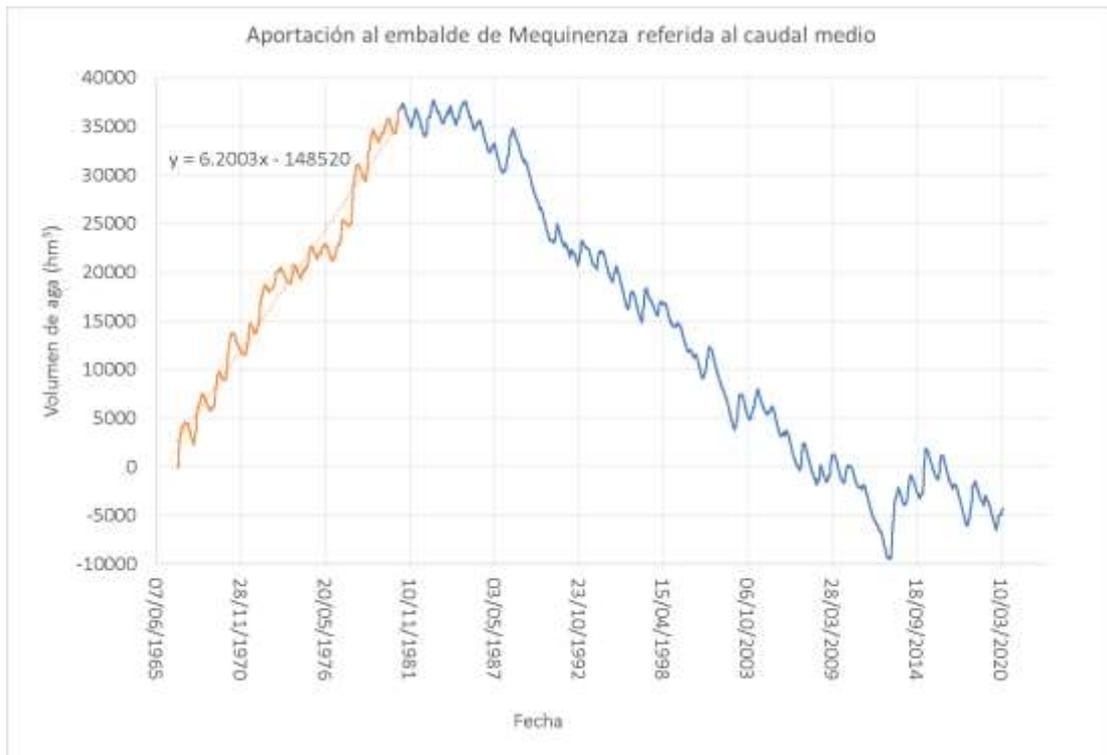


Figura 21: Aportación acumulada referida al caudal medio (1967-2020). Ajuste del caudal medio del período 1967-1982



Figura 22: Aportación acumulada referida al caudal medio (1967-2020). Ajuste del caudal medio del período 1985-2020.

Considerando que este embalse retiene la totalidad de sedimento aportado, bien sea por arrastre de fondo o en suspensión, se puede obtener una relación entre caudal líquido y caudal sólido que proporciona un volumen determinado de sedimento

aportado al embalse. Tomando como fecha de inicio de las aportaciones, el 01/10/1966, con una relación:

$$\frac{Q_{sólido}}{Q_{líquido}} = 0.6 \cdot 10^{-3}$$

se obtiene un volumen de sedimento acumulado aportado al embalse de 94.5 hm³ el 01/10/1982. Con esta relación se obtiene que el volumen 207.2 hm³ de sedimento en el 01/10/2012 y de 244.9 hm³ el 14/04/2020, valores que concuerdan con los obtenidos con la otra metodología descrita en los apartados anteriores, como se aprecia en la figura 23. Puesto que todo el volumen de sedimento que llega al embalse queda retenido, se ha comprobado que existe una relación lineal entre la aportación de agua y la de sedimento.

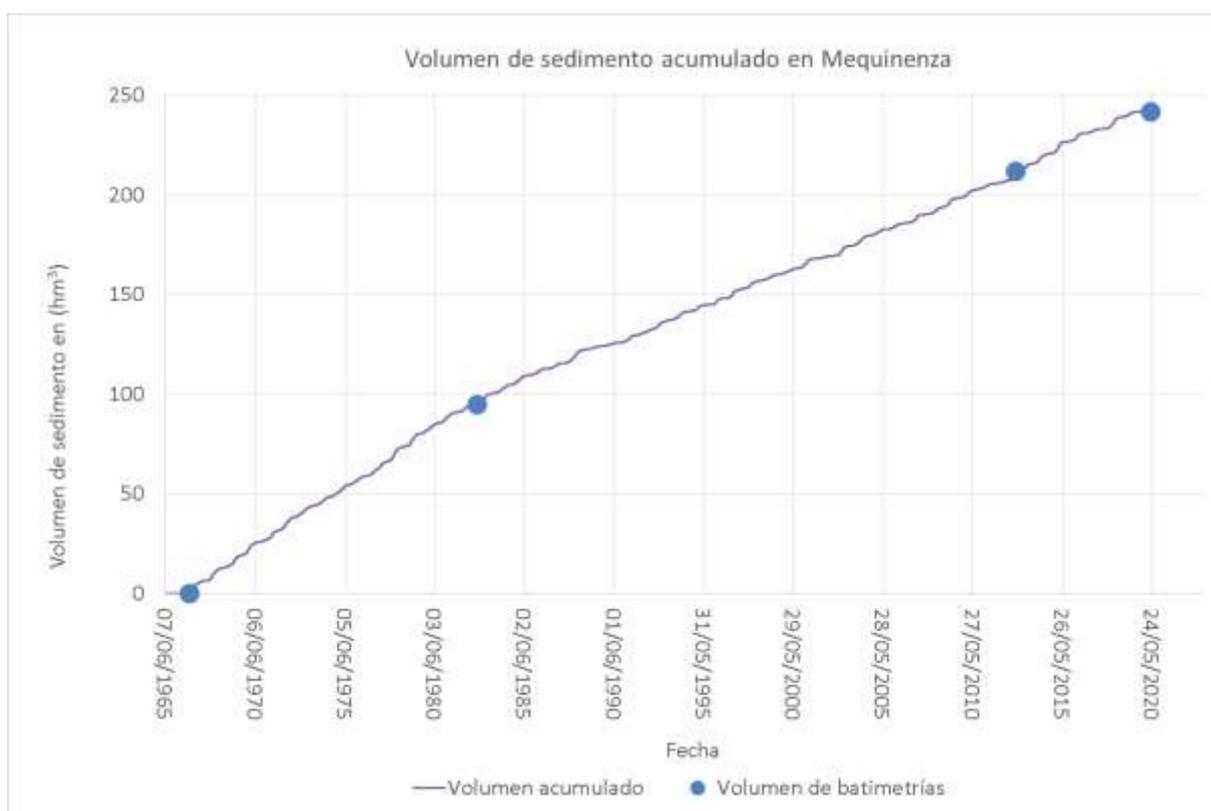


Figura 23: Evolución del volumen de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza

Es conveniente aclarar en este punto que aunque aquí se ha obtenido un coeficiente medio que reproduce correctamente el balance sedimentológico del embalse, este valor no es constante siendo mayor durante los episodios de avenida que con caudales más bajos. Sin embargo a los efectos de este estudio esta aproximación resulta adecuada.

Si se calcula el volumen medio diario de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza de la serie histórica desde su puesta en explotación, se obtiene un valor de 12524 m³/día. Si se refiere la serie de sedimentación acumulada al caudal medio se pone de manifiesto el cambio de tendencia de aportaciones que se había descrito anteriormente, y que se muestra en la figuras 24 y 25. Las tasa anual media en el

período 1966 a 1982 resulta de 5.99 hm³/año ó 6.75 Mt/año, y en el segundo período resulta de 3.87 hm³/año ó 4.36 Mt/año, un 64,6% de la inicial.

En el estudio inédito del CEDEX (2002) se estimaba el aporte de sedimentos en Mequinenza en 6,86 Mt/año, valor muy ajustado al calculado en este estudio para el período 1966-1986

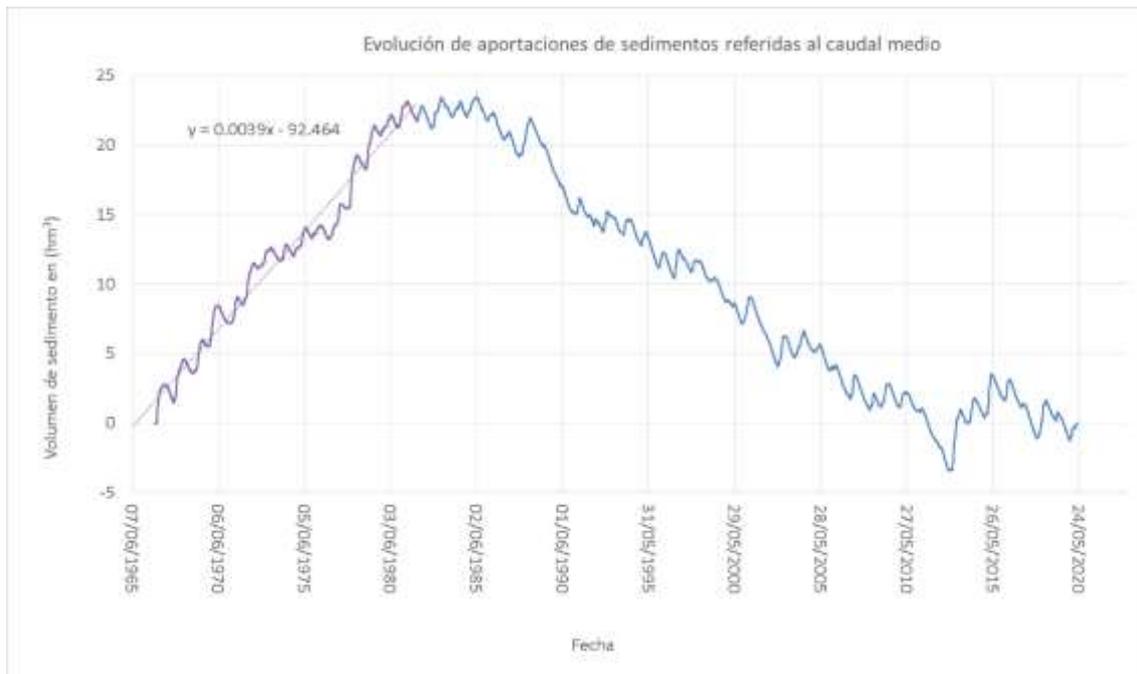


Figura 24: Evolución del volumen de sedimento acumulado referido al caudal medio del embalse de Mequinenza. Ajuste del caudal medio del tramo 1966-1982

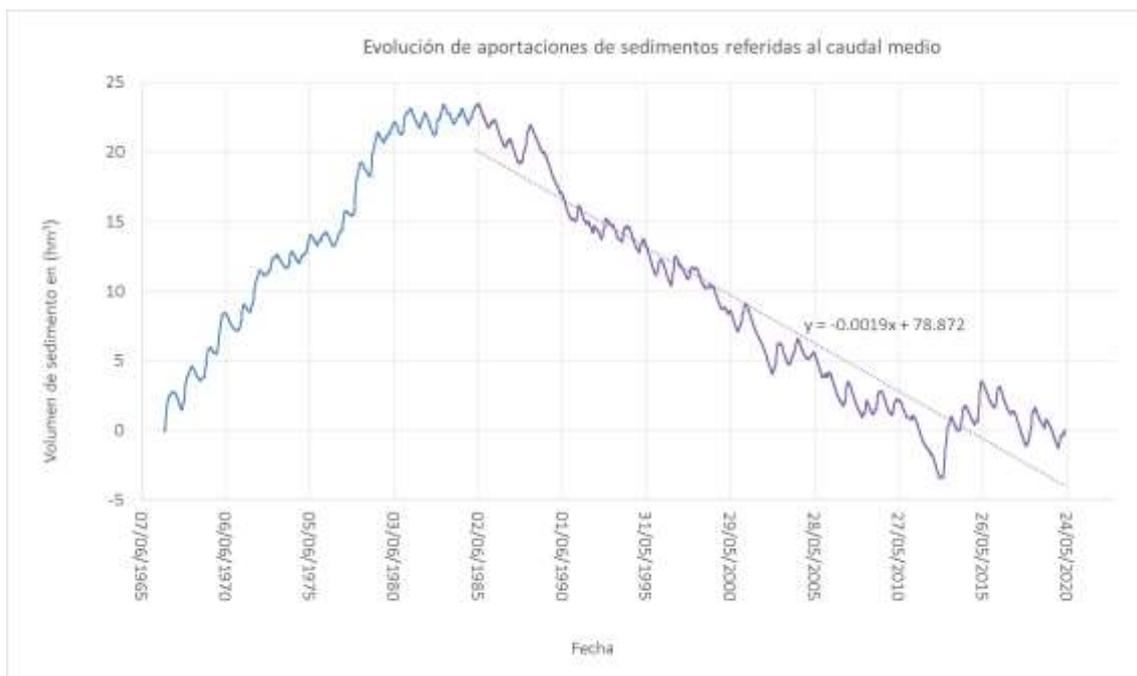


Figura 25: Evolución del volumen de sedimento acumulado referido al caudal medio del embalse de Mequinenza. Ajuste del caudal medio del tramo 1985-2020

3.7. Caracterización del sedimento de la cola del embalse de Mequenza

En este apartado se analiza con más detalle el sedimento localizado en la cola del embalse. La figura 26 muestra el volumen de sedimento entre los tramos 30 y 51, correspondientes a los últimos 42 km del embalse, en los tres intervalos temporales considerados. Se aprecia en esta figura que en el entorno de Chiprana (PK 80), se localiza una zona de menor depósito. Esto proporciona una explicación al análisis realizado por Control de Obras en el que se indica la pequeña variación de sedimentación observada entre el sondeo realizado para el proyecto del puente y el realizado en 2012. En el estudio de Control de Obras se concluía que la sedimentación se había producido en un primer momento de llenado del embalse, pero se aprecia que en esta zona existe menor sedimentación que en los tramos colindantes.

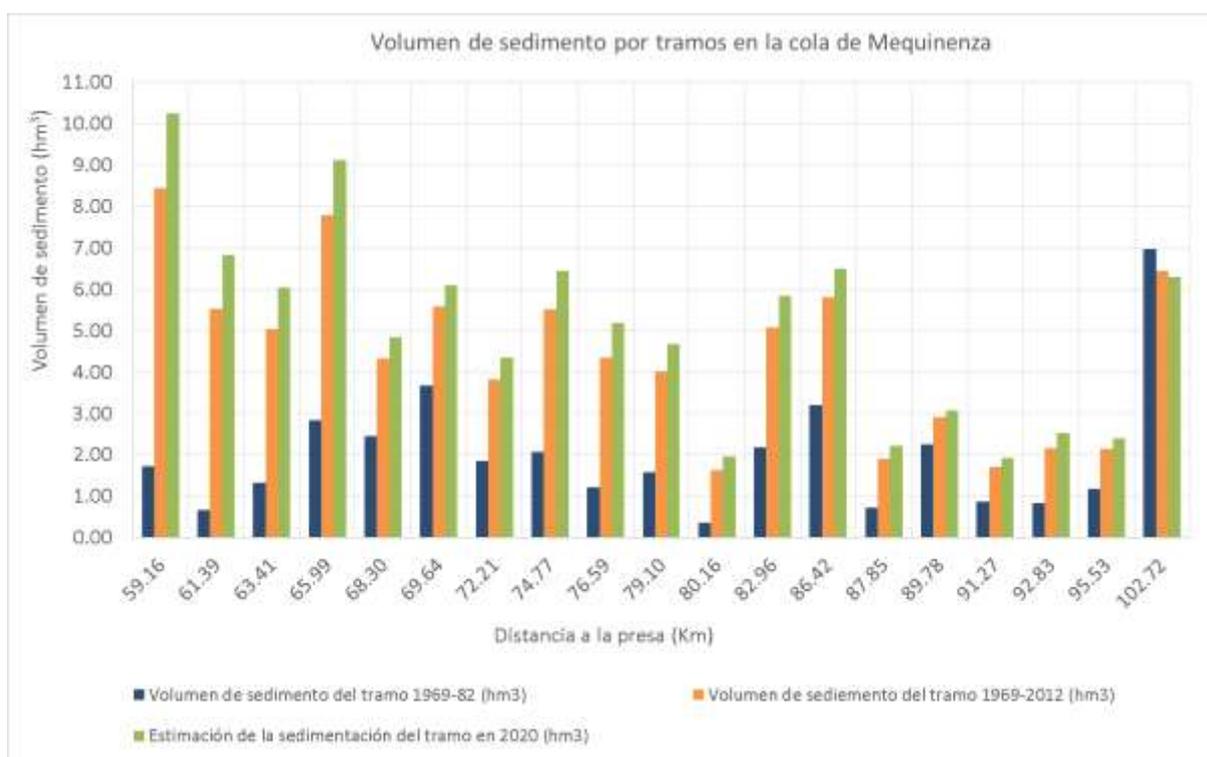


Figura 26. Volumen de sedimento por tramos en 1982, 2012 y 2020.

La figura 27 presenta estos valores de sedimentación acumulados con origen en el tramo 30, en torno a la desembocadura del Guadalope. Se aprecia que el volumen de sedimento acumulado en este tramo hasta 1982 fue de 37.92 hm³, este valor asciende a 84.21 hm³ en 2012. En la actualidad se estima que existen en este tramo un total de 96.55 hm³.

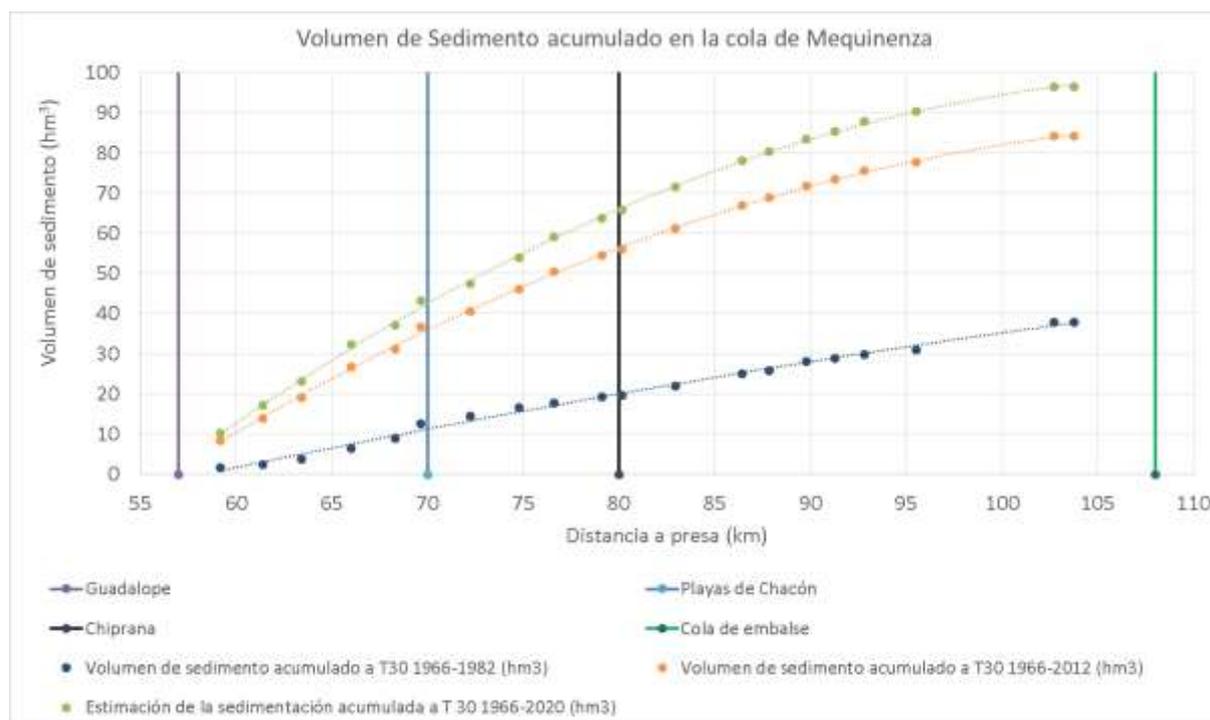


Figura 27. Evolución sedimentológica del embalse de Mequenza

La tabla 4 proporciona las columnas estratigráficas obtenidas en los sondeos realizados en el año 2012 para la caracterización del sedimento en la cola del embalse de Mequenza. Estos sondeos se sitúan entre los PK 74 al 90. Con la información de la tabla 4 se han calculado los porcentajes de cada tipo de sedimento encontrado (tabla 13).

Tabla 13: Caracterización del sedimento de los sondeos del estudio de Control de Obras de 2012

Sondeo	PK	% gravas	% arena	% limo	% limo arenoso	% arena fangosa	% limo fangoso	% arenisca	% tierra vegetal
10	74	3.7	64.2	0.0	0.0	32.1	0.0	0.0	0.0
9	75	18.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.8
8	76	8.7	0.0	45.7	0.0	45.7	0.0	0.0	0.0
7	77	0.0	33.3	0.0	66.7	0.0	0.0	0.0	0.0
6	79	2.2	32.2	33.3	0.0	0.0	32.2	0.0	0.0
5	80	0.0	0.0	33.3	0.0	0.0	33.4	33.3	0.0
4	82	33.4	0.0	0.0	0.0	33.3	0.0	33.3	0.0
3	85	2.0	49.0	0.0	49.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	88	16.8	0.0	2.1	0.0	81.1	0.0	0.0	0.0
1	90	4.8	47.6	0.0	47.6	0.0	0.0	0.0	0.0

En primer lugar se han localizado los sondeos practicados en los tramos de embalse empleados para las cubriciones. Se dispone de sondeos en todos los tramos comprendidos entre el T36 y el 44.

Con el fin de estimar el volumen de material granular existente entre el PK-72 y el PK-90 se ha asumido que los repartos por tipo de sedimento obtenidos en los sondeos son representativos de todo el tramo.



En la siguiente tabla 14 se indican los sondeos que se ubican en cada tramo y los porcentajes que resultarían de aplicación en cada uno de ellos.

Tabla 14: Caracterización del tipo de sedimento por tramo de embalse

Tramo	Distancia a la presa (km)	Volumen sediment tramo 2020 (hm ³)	Sondeo	% grava	% arena	% limo	% limo arenoso	% arena fangosa	% limo fangoso	% arenisca	% tierra vegetal
T 36	72.2	4.34	10	3.7	64.2	0.0	0.0	32.1	0.0	0.0	0.0
T 37	74.8	6.44	9 y 8	13.4	0.0	22.8	0.0	22.8	0.0	0.0	40.9
T 38	76.6	5.19	7	0.0	33.3	0.0	66.7	0.0	0.0	0.0	0.0
T 39	79.1	4.68	6	3.3	48.3	50.0	0.0	0.0	48.3	0.0	0.0
T 40	80.2	1.96	5	0.0	0.0	33.3	0.0	0.0	33.4	33.3	0.0
T 41	83.0	5.85	4	33.4	0.0	0.0	0.0	33.3	0.0	33.3	0.0
T 42	86.4	6.49	3	6.7	166.7	0.0	166.7	0.0	0.0	0.0	0.0
T 43	87.8	2.22	2	80.0	0.0	10.0	0.0	385.0	0.0	0.0	0.0
T 44	89.8	3.08	1	4.8	47.6	0.0	47.6	0.0	0.0	0.0	0.0

Aplicando estos porcentajes sobre el volumen de sedimento de cada tramo se ha obtenido el volumen de sedimento de cada tipo que se muestra en la tabla 15.

Tabla 15: Estimación del volumen de cada tipo de sedimento por tramos

Tramo	Distancia a la presa (km)	Vol. sediment tramo 2020 (hm ³)	Vol. grava tramo 2020 (hm ³)	Vol. arena tramo 2020 (hm ³)	Vol. limo tramo 2020 (hm ³)	Vol. limo arenoso tramo 2020 (hm ³)	Vol. arena fangosa tramo 2020 (hm ³)	Vol. limo fangoso tramo 2020 (hm ³)	Vol. arenisca tramo 2020 (hm ³)	Vol. tierra vegetal tramo 2020 (hm ³)
T 36	72.2	4.34	0.17	2.91	0.00	0.00	1.45	0.00	0.00	0.00
T 37	74.8	6.44	0.88	0.00	1.49	0.00	1.49	0.00	0.00	2.68
T 38	76.6	5.19	0.00	1.72	0.00	3.45	0.00	0.00	0.00	0.00
T 39	79.1	4.68	0.16	2.31	2.39	0.00	0.00	2.31	0.00	0.00
T 40	80.2	1.96	0.00	0.00	0.64	0.00	0.00	0.64	0.64	0.00
T 41	83.0	5.85	2.01	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00
T 42	86.4	6.49	0.46	11.46	0.00	11.46	0.00	0.00	0.00	0.00
T 43	87.8	2.22	1.81	0.00	0.23	0.00	8.69	0.00	0.00	0.00
T 44	89.8	3.08	0.16	1.64	0.00	1.64	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	72-90	40.2	5.64	20.04	4.75	16.55	13.64	2.95	2.65	2.68

Del análisis de la tabla 15 se desprende que de los 40.2 hm³ de sedimento que se estima que existen entre los PK 72 a 90, 20.05 hm³ serían de arena y 5.64 hm³ de grava.



3.8. Resumen

Como resumen de los trabajos realizados en este apartado para la caracterización del sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza pueden establecerse los siguientes valores:

Capacidad del embalse de Mequinenza:

- Capacidad inicial del embalse de Mequinenza (1966) estimada en este informe: 1483,29 hm³
- Capacidad teórica del embalse de Mequinenza (1966) en su puesta en servicio: 1530 hm³

Volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mequinenza:

- Volumen de sedimentos acumulados en Mequinenza en 1982 calculados en ese informe en dicha fecha a partir de la batimetría de 1982 y la topografía de 1961: 95 hm³
- Volumen de sedimentos acumulados en Mequinenza en 2012 estimados en este informe: 211 hm³ (determinado a partir de la tendencia de las tasas de sedimentos en la cola del embalse calculadas en este estudio con la información disponible: 6,68 M/año en el periodo de 1966 a 1982 y 4,37 Mt/año entre 1982 y 2012)
- Volumen de sedimentos acumulados en Mequinenza en 2020 estimados en este informe: entre 242 hm³ (calculado con las mismas tasas de aportación de sedimentos de antes) y 244,9 hm³ (calculado mediante un ajuste hidrológico)

Caracterización de los sedimentos acumulados en el tramo de cola del embalse de Mequinenza:

- Volumen de sedimentos acumulados en los 42 km de cola del embalse de Mequinenza calculado en este informe: 37,92 hm³ (1982) y 84,2 hm³ (2012)
- Volumen de sedimentos acumulados en los 42 km de cola del embalse de Mequinenza estimados en este informe en 2020: 96.55 hm³
- Caracterización del sedimento en la cola del embalse. En el presente informe se calcula que de los 40.2 hm³ de sedimento que se estima que existen entre los PK 72 a 90, 20.05 hm³ serían de arena y 5.64 hm³ de grava

4. CARACTERIZACIÓN DEL SEDIMENTO DEL EMBALSE DE RIBARROJA

En este apartado se incluyen los estudios realizados por el CEDEX en el marco de la tarea 2.1, conforme a lo indicado en el capítulo 1 de esta nota técnica, para actualizar los cálculos del volumen de sedimento retenido actualmente en 2020, en el embalse de Ribarroja.

Para este análisis se ha partido del estudio batimétrico realizado por del grupo Grupo Flumen en 2007 que acotaba los depósitos sedimentarios en el embalse de Ribarroja entre 13 y 16.6 hm³. No ha sido posible recopilar la información batimétrica digital para realizar un análisis semejante al de Mequinenza que permitiera obtener las tasas de sedimentación por tramos a lo largo del embalse. Sin embargo, esta información es suficiente para estimar la tasa de sedimentación global del embalse, la cual se ha calculado en esta nota técnica mediante una correlación del régimen hidrológico, de manera similar a como se hizo en el apartado 3.5 para el embalse de Mequinenza

La serie de caudales diarios de entrada al embalse de Ribarroja se ha obtenido del anuario de aforos del CEDEX, como combinación de los registros de las estaciones 9017 en río Cinca en Fraga y la 9025 en el río Segre en Seros, para el período 1967 hasta 2016. En primer lugar se han completado las series de caudales, conservando el valor medio de la relación de los caudales de los ríos Cinca y Segre. La serie de caudales de entrada al Embalse de Ribarroja se presenta en la figura 28. Se aprecia, que como en el caso del río Ebro, el ajuste lineal de la serie de caudales presenta una pendiente decreciente de 6.8 l/s/día. Este valor es semejante a la reducción de caudal observada en el Ebro de 6.2 l/s/día (apartado 3.6).

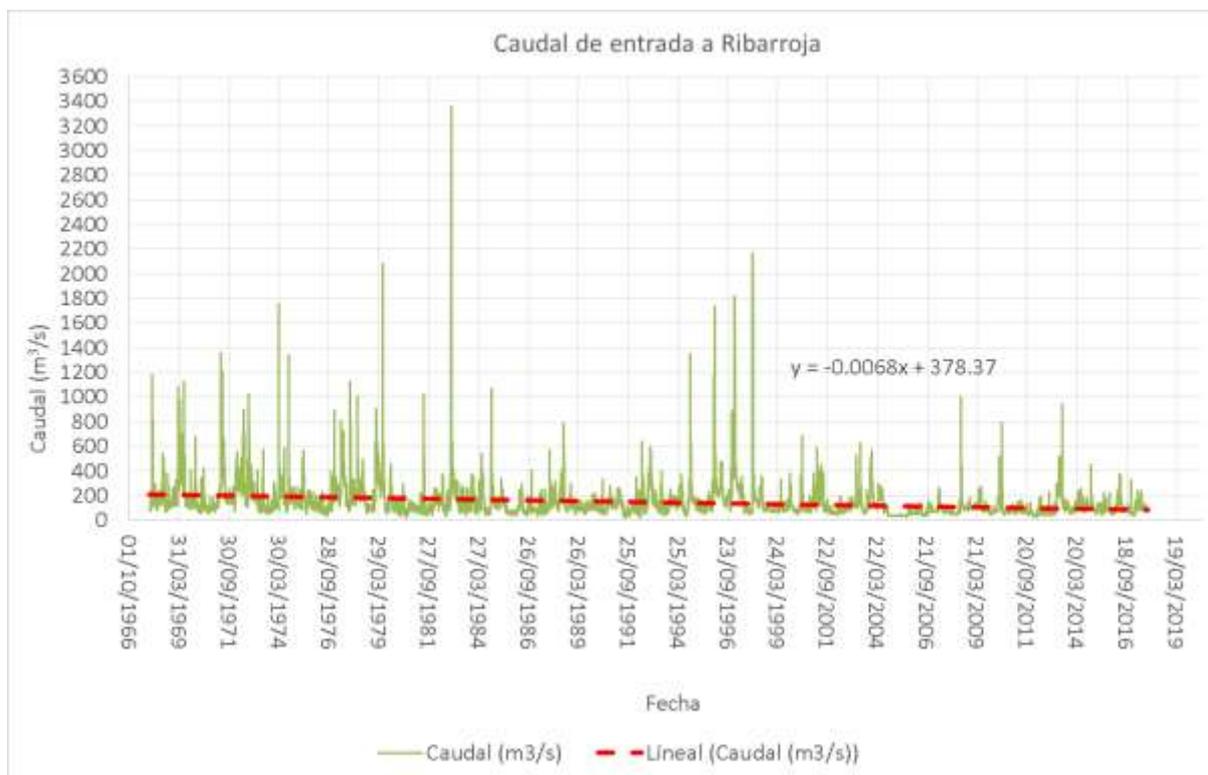


Figura 28. Serie histórica de caudales de entrada al embalse de Ribarroja



El caudal medio de la serie histórica es de 12.69 hm³/día. La figuras 29 y 30 muestran la aportación aculada al embalse de Ribarroja, referida al caudal medio. Se aprecia, como en el caso del Ebro, un cambio de tendencia en la evolución de las aportaciones, aunque en este caso se aprecia una “meseta” más amplia durante las décadas de los años 80 y 90. El caudal medio del período 1967-1980 era 17.71 hm³/día, mientras que en el período 2004-2016 es de 8.25 hm³/día.



Figura 29. Aportaciones acumuladas referidas al caudal medio del embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal medio del tramo 1967-1980



Figura 30. Aportaciones acumuladas referidas al caudal medio del embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal medio del tramo 2004-2016

Con estos datos se ha calculado la relación de caudal líquido y sólido que proporciona una sedimentación acumulada en octubre de 2007, acotada entre 13 y 16.6 hm³:

$$0.65 \cdot 10^{-4} < \frac{Q_{sólido}}{Q_{líquido}} < 0.832 \cdot 10^{-4}$$

La figura 31 muestra la horquilla de variación de la sedimentación del embalse. De acuerdo con estos valores, a fecha de octubre de 2016 la sedimentación en Ribarroja está acotada entre 15 y 19.3 hm³.

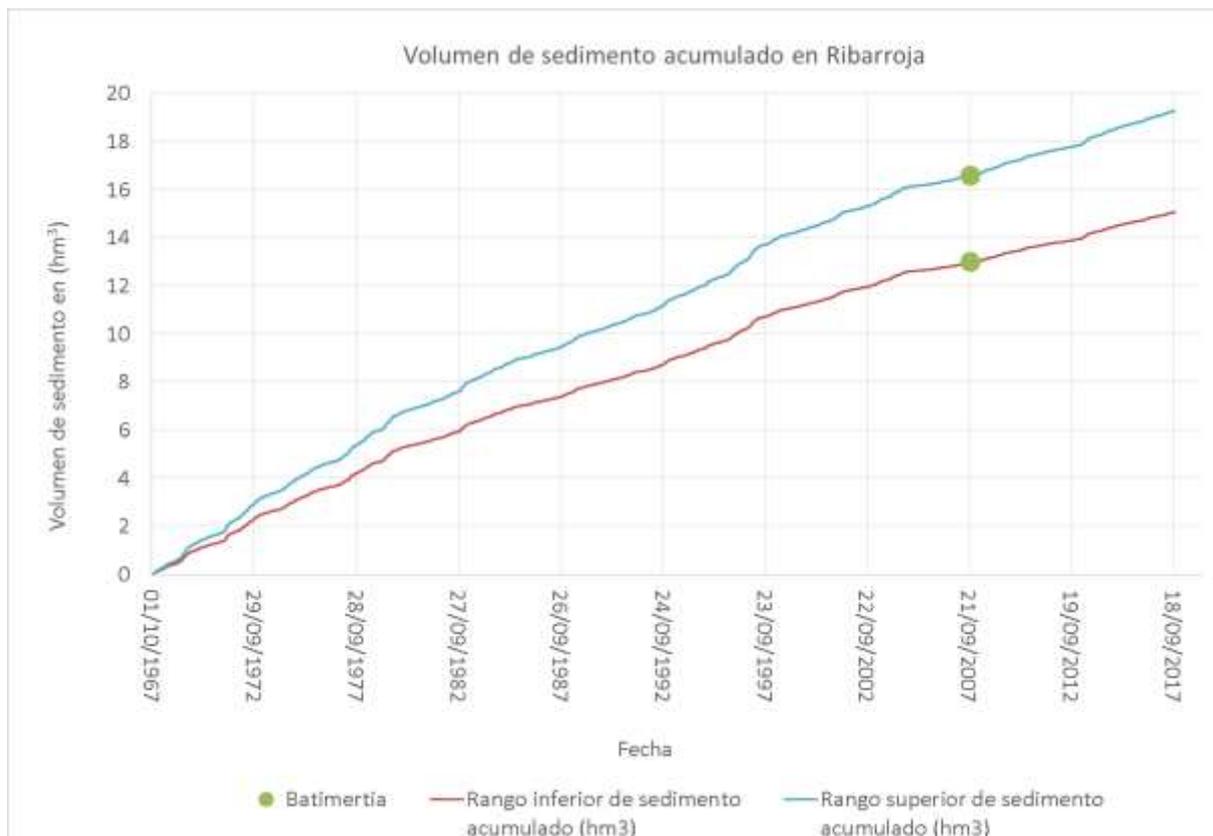


Figura 31. Rango de sedimentación acumulada en el embalse de Ribarroja

Partiendo del valor del rango medio de sedimentación, se ha obtenido la evolución de la sedimentación del embalse referida al caudal medio de sedimentación. Este caudal es de 940 m³/día. La figura 32 muestra el ajuste del caudal de sedimentación de los primeros años de explotación (1967-1980), que resultó de 1340 m³/día. La figura 33 corresponde al ajuste de los últimos años (2004-2016). El ritmo de sedimentación de este último período es de 640 m³/día. De acuerdo con esto, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0.55 Mt/año, valor que desciende prácticamente a mitad, 0.26 Mt/año en el período 2004-2016.

Por tanto, considerando un porcentaje de retención de sedimento del 40 % (Flumen, 2009) en la entrada se Ribarroja el aporte de sedimento fue de 1.35 Mt/año, valor que coincide con el estudio inédito del CEDEX (2002).



Figura 32. Rango medio de sedimentación acumulada referida al caudal medio en el embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal del tramo 1967-1980



Figura 33. Rango medio de sedimentación acumulada referida al caudal medio en el embalse de Ribarroja. Ajuste del caudal del tramo 2004-2016

5. REVISIÓN DE LOS DATOS DE AFORO SÓLIDO REALIZADOS POR EL CEDEX

5.1. Introducción

En el apartado 2.3 del presente informe se indica que el CEDEX realizó durante los años 70 y 90 numerosos aforos sólidos en una amplia red de estaciones. La figura 34 muestra las estaciones de medida de la cuenca del río Ebro.

En este apartado, y a partir de la información de los aforos sólidos realizados en dichas estaciones, se van a realizar una serie de ajustes para obtener las tasas de aporte de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja.

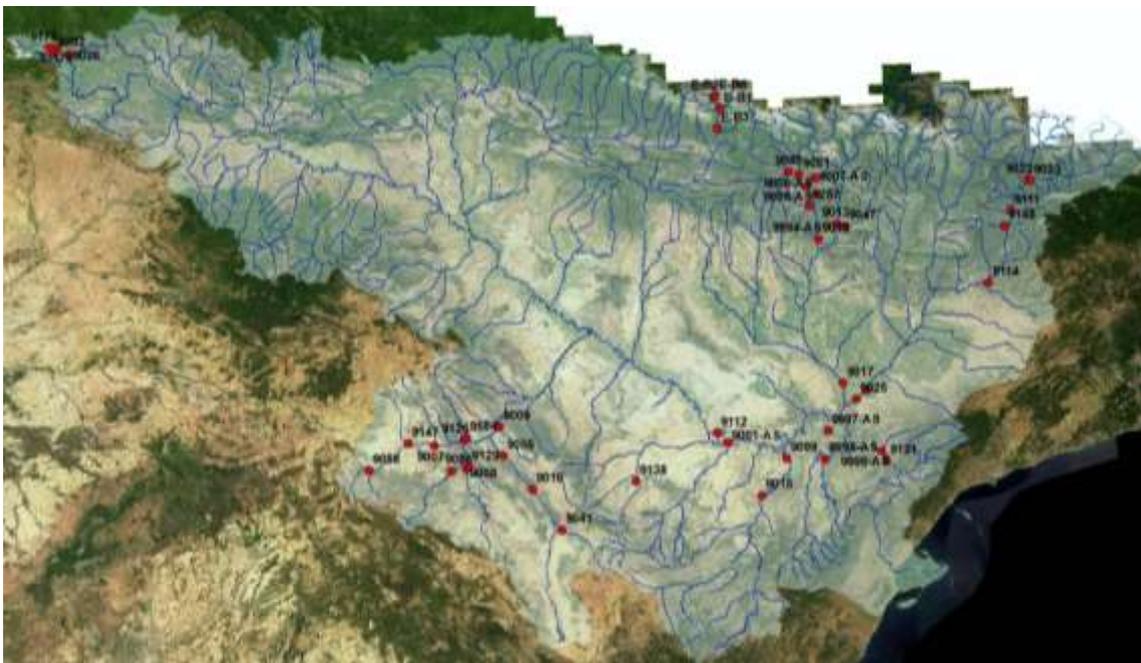


Figura 34. Red de estaciones de aforo sólido en la cuenca del Ebro.

Las estaciones que resultan de mayor interés (ver figura 1 y figura 35) para el presente estudio, son las que se sitúan en cabecera de los embalses de Mequinenza y de Ribarroja y aguas abajo de Flix. Lamentablemente de la estación de Flix no se dispone más que un registro del año 1988 por lo que no es posible realizar un análisis como en las demás estaciones.

Tabla 16: Estaciones de aforo sólido analizadas.

Margen	Código estación	Río	Localidad	Periodo de medida
derecha	9001-AS	Martín	Escatrón	1987-1990
derecha	9099	Guadalope	Caspe	1988-1990
izquierda	9017	Cinca	Fraga	1975-1990
izquierda	9025	Segre	Seros	1980-1989
izquierda	9112	Ebro	Gelsa	1986-1990
izquierda	9121	Ebro	Flix	1988



Figura 35. Estaciones de aforo sólido próximas a la zona de estudio

En estas campañas de aforo se midieron sólidos en suspensión y en disolución, siendo mayor la concentración de estos últimos. Viendo las características del sedimento existente en el embalse es probable que la fracción de sólidos en disolución también pueda generar depósito de sedimentos, por lo que se han calculado las aportaciones de sedimentos totales durante el período en que los aforos fueron realizados.

La metodología seguida para el presente análisis es la siguiente. En primer lugar, partiendo de los registros de cada estación, se ha realizado un ajuste estadístico de las leyes que relacionan el caudal líquido con el caudal de sólidos medidos (que incluye los sólidos en suspensión y en disolución) y con las de caudal sólido en suspensión. Las curvas que relacionan caudal líquido con caudal sólido en suspensión presentan un buen ajuste potencial, mientras que las curvas que relacionan el caudal líquido con el sólido medido, presentan un mejor ajuste lineal. A partir de estas relaciones, y disponiendo de los registros de caudal medio diario, se ha calculado la serie de caudales sólidos durante los períodos de tiempo que cubre cada estación. Finalmente, se ha obtenido la tasa anual de transporte de sedimento.

5.2. Aportes de sedimento en el embalse de Mequinenza

El embalse de Mequinenza se encuentra en el propio cauce del río Ebro y recibe además aportaciones sólidas del río Martín en su cola y del río Guadalupe aproximadamente en el PK 59, medido por el eje del río desde la presa. Las estaciones



empleadas para aforar tales aportes fueron la de Gelsa (9112), antiguamente Sástago, en el Ebro, aguas arriba de la cola de Mequinenza; a estación de Escatrón (9001-AS), en el río Martín, también en cola de Mequinenza; y finalmente, la de Caspe (9099) en el río Guadalope, próxima a su desembocadura en el embalse. Podría incluirse en este cómputo, las aportaciones sólidas procedentes de la carga de lavado de las laderas del embalse que, para un embalse de 108 km de longitud y aproximadamente 500 km de línea de costa, no serían despreciables. Esto, sin embargo, queda fuera del alcance del presente estudio.

Como se justifica a continuación, la adición de las tasas anuales de aporte de sedimento obtenidas en estas estaciones proporciona la tasa anual de aporte de sedimento al embalse de Mequinenza que, para el período 1986-1990, resulta de 4.87 Mt/año de sólidos medidos, de los cuales 0.54 Mt/año serían de sólidos en suspensión. A estas aportaciones habría que añadir la aportación de sedimentos por transporte de fondo. Estos valores difieren de la tasa de sedimentación obtenida de los estudios batimétricos que para este período es de 4.36 Mt/año (apartado 3.6), y engloba todo el material sedimentado. Esta diferencia puede interpretarse de diferentes formas. Por un lado, es posible que las tasas de sedimento en suspensión obtenidas en los aforos de sólidos sean muy inferiores a las reales, precisamente porque estos aforos no se hacen en situación de avenida. Por otro lado puede que la deposición del sedimento disuelto aporte un volumen significativo al embalse. En este segundo caso, la sedimentación del material sólido en suspensión sería total y la de sedimento en disolución sería parcial de un 85% de la carga. Teniendo en cuenta que el tiempo medio de renovación del agua en el embalse es de unos 70 días, no parece posible que se alcancen porcentajes tan altos. Un detallado estudio sedimentológico del embalse permitiría comprobarlo.

5.2.1 Aportaciones del Ebro en Gelsa

Los registros de esta serie corresponden a 12 aforos realizados entre 1986 y 1990, con caudales comprendidos entre 885.5 m³/s y 22.1 m³/s.

Tabla 17: Aforos sólidos en Gelsa (Ebro)

Fecha	Caudal (m ³ /s)	Carga de sólidos medidos (g/s)	Carga de sólidos en suspensión (g/s)
10/03/1986	240.12	162745.5	9067.6
25/05/1987	98.74	130772.3	2305.8
17/12/1987	396.72	296246.8	55035.9
10/02/1988	885.53	565150	162232
21/04/1988	796.31	551973.3	134708.4
09/06/1988	144.09	135713.9	12367.7
13/02/1989	71.8	94871.1	2102.4
08/05/1989	119.85	99744	7223
21/10/1989	46.65	75126	1980
20/12/1989	67.94	87806	2332
17/02/1990	268.37	185818	92155
18/03/1990	22.09	34679	1547.3

Las figuras 36 y 37 muestran los ajustes obtenidos para las curvas que relacionan caudal líquido y caudal sólido y la reconstrucción de la serie de caudales sólidos del

período 1986 a 1990. Finalmente la tabla 18 presenta las de tasas anuales de sedimento transportadas por el río Ebro en Gelsa.

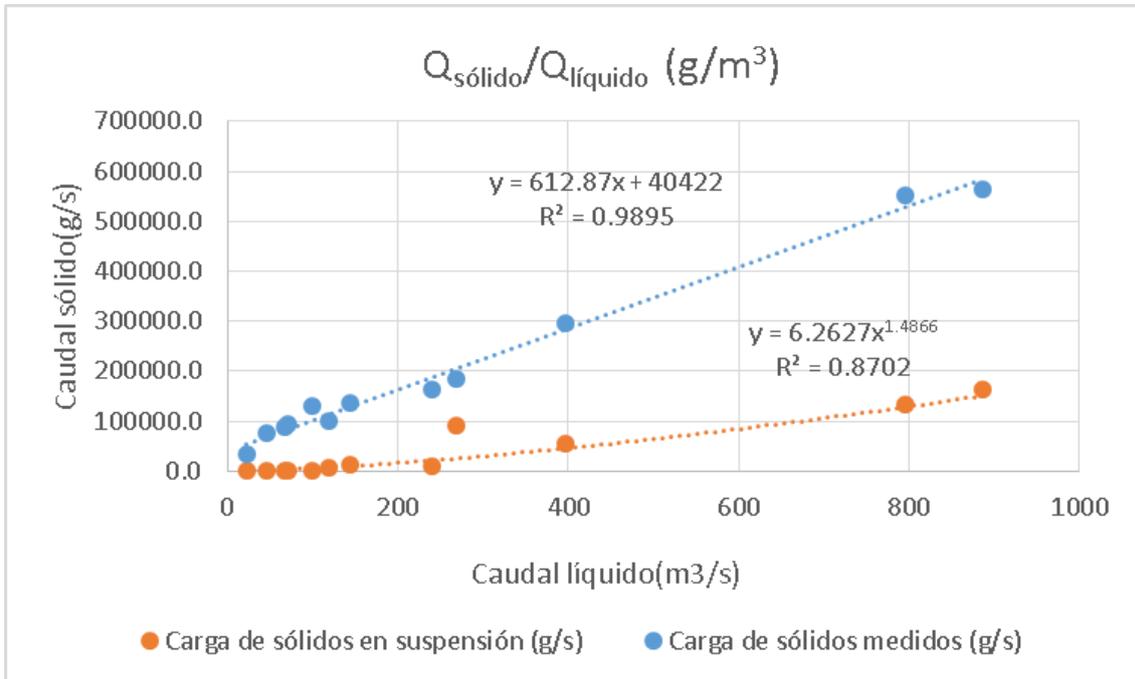


Figura 36. Ajuste de las relaciones de caudal líquido con los caudales sólidos

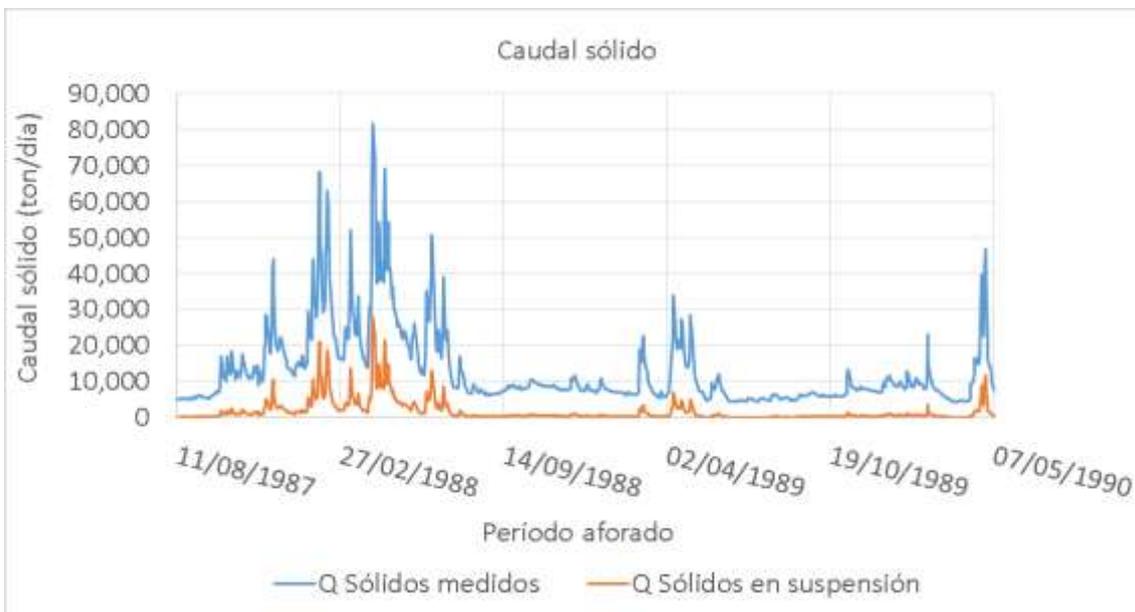


Figura 37. Serie de caudal sólido en el río Ebro en Gelsa.



Tabla 18: Tasa anuales de sedimento transportado por el Ebro en Gelsa

Año	Tasa anual de sólidos medidos (Mt/año)	Tasa anual de sólidos en suspensión (Mt/año)
1986	4.23	0.47
1987	4.76	0.57
1988	6.97	1.18
1989	2.95	0.19
1990	3.12	0.23
Promedio	4.406	0.528

5.2.2 Aportaciones del Martín en Escatrón

Los registros de esta serie corresponden a 11 aforos realizados entre 1987 y 1990, con caudales comprendidos entre 4.81 m³/s y 0.12 m³/s.

Tabla 19: Aforos sólidos en Escatrón (Martín)

Fecha	Caudal (m ³ /s)	Carga de sólidos medidos (g/s)	Carga de sólidos en suspensión (g/s)
20/02/1987	0.92	2749.0	53.9
19/05/1987	1.04	2549.0	96.6
12/02/1988	1.62	585.6	128.3
21/04/1988	4.81	24603.0	14996.0
09/06/1988	0.77	2351.0	76.8
14/02/1989	2.13	5182.0	276.6
09/05/1989	0.12	277.2	7.2
21/10/1989	1.01	2946.0	36.7
20/12/1989	1.56	4298.9	85.8
16/02/1990	0.3	912.9	6.7
17/03/1990	1.29	4070.7	86.4

Las figuras 38 y 39 muestran los ajustes obtenidos para las curvas que relacionan caudal líquido y caudal sólido y la reconstrucción de la serie de caudales sólidos del período 1987 a 1990. La tabla 20 presenta las de tasas anuales de sedimento transportadas por el río Martín en Escatrón.

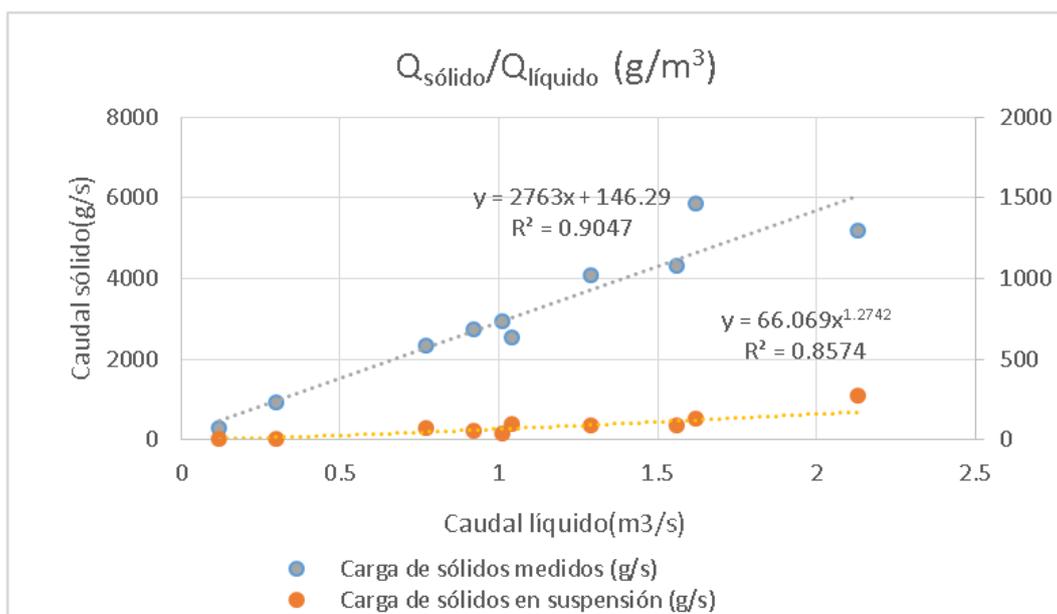


Figura 38. Ajuste de las relaciones de caudal líquido con los caudales sólidos

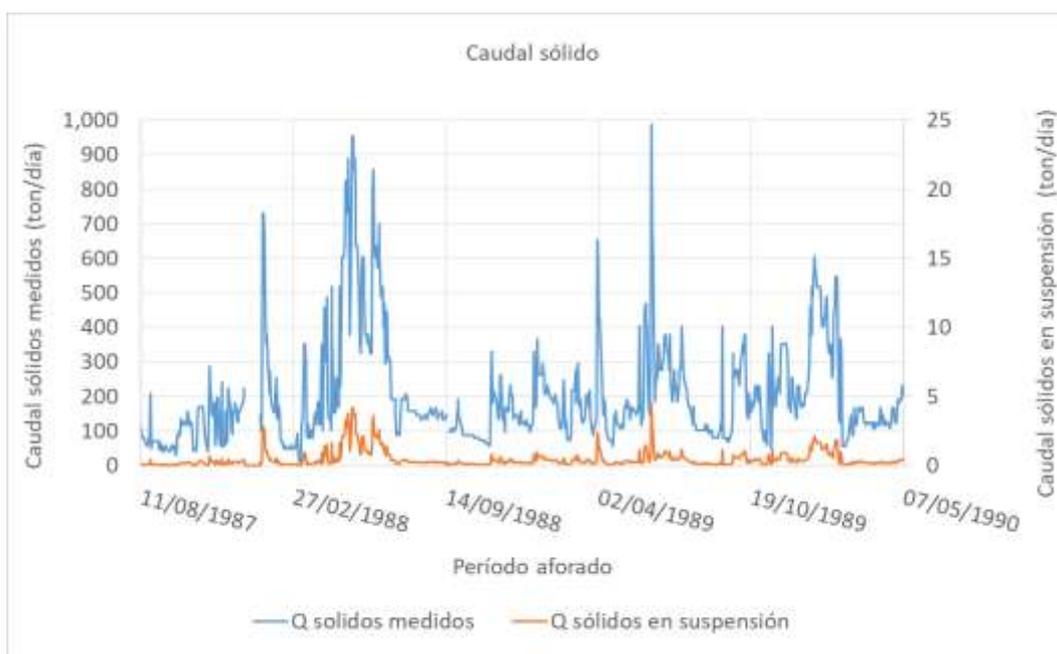


Figura 39. Serie de caudal sólido en el río Martín en Escatrón

Tabla 20: Tasas anuales de sedimento transportado por el río Martín en Escatrón

Año	Tasa anual de sólidos medidos (Mt/año)	Tasa anual de sólidos en suspensión (Mt/año)
1987	0.043	7.26E-05
1988	0.080	0.000206
1989	0.072	0.000152
1990	0.071	0.000148
Promedio	0.0665	0.000145

5.2.3. Aportaciones del río Guadalope en Caspe

Los registros de esta serie corresponden a 7 aforos realizados entre 1988 y 1990, con caudales comprendidos entre 2.6 m³/s y 0.3 m³/s.

Tabla 21: Aforos sólidos en Caspe (Guadalope)

Fecha	Caudal (m ³ /s)	Carga de sólidos medidos (g/s)	Carga de sólidos en suspensión (g/s)
09/06/1988	2.61	1408.3	29.6
14/02/1989	2.41	2488	43.9
09/05/1989	0.61	458.4	18.3
20/10/1989	0.49	475.3	6.0
20/12/1989	0.30	370.4	1.9
16/02/1990	0.39	290.3	5.9
17/03/1990	0.33	356.3	3.4

Las figuras 40 y 41 muestran los ajustes obtenidos para las curvas que relacionan caudal líquido y caudal sólido y la reconstrucción de la serie de caudales sólidos del período 1988 a 1990. La tabla 22 presenta las aportaciones anuales de sedimento del Guadalope en Caspe.

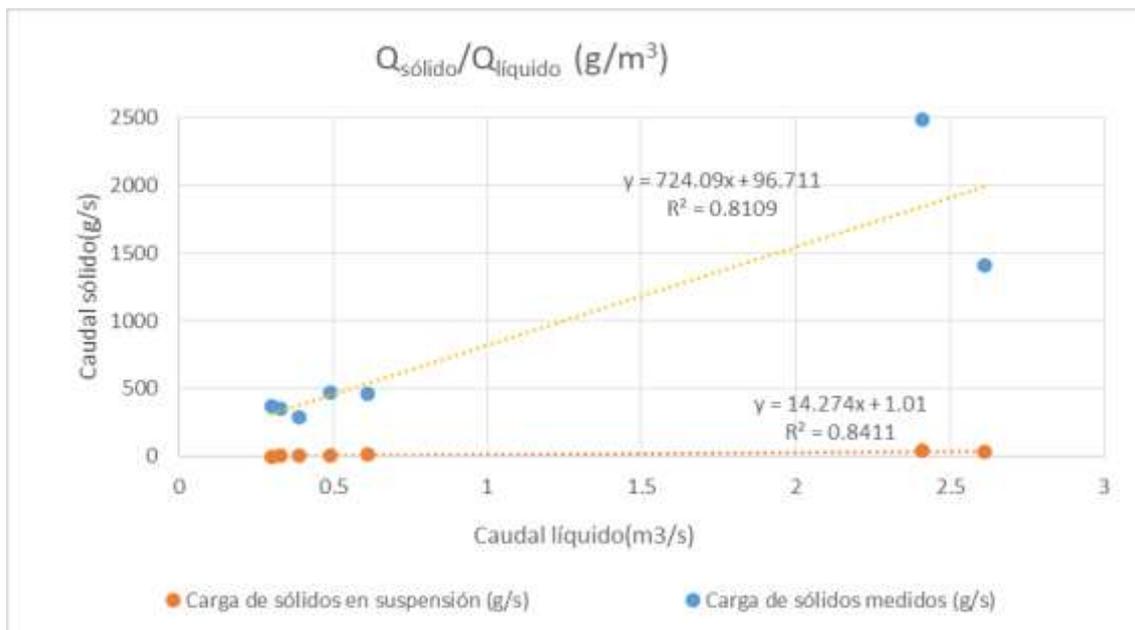


Figura 40. Ajuste de las relaciones de caudal líquido con los caudales sólidos

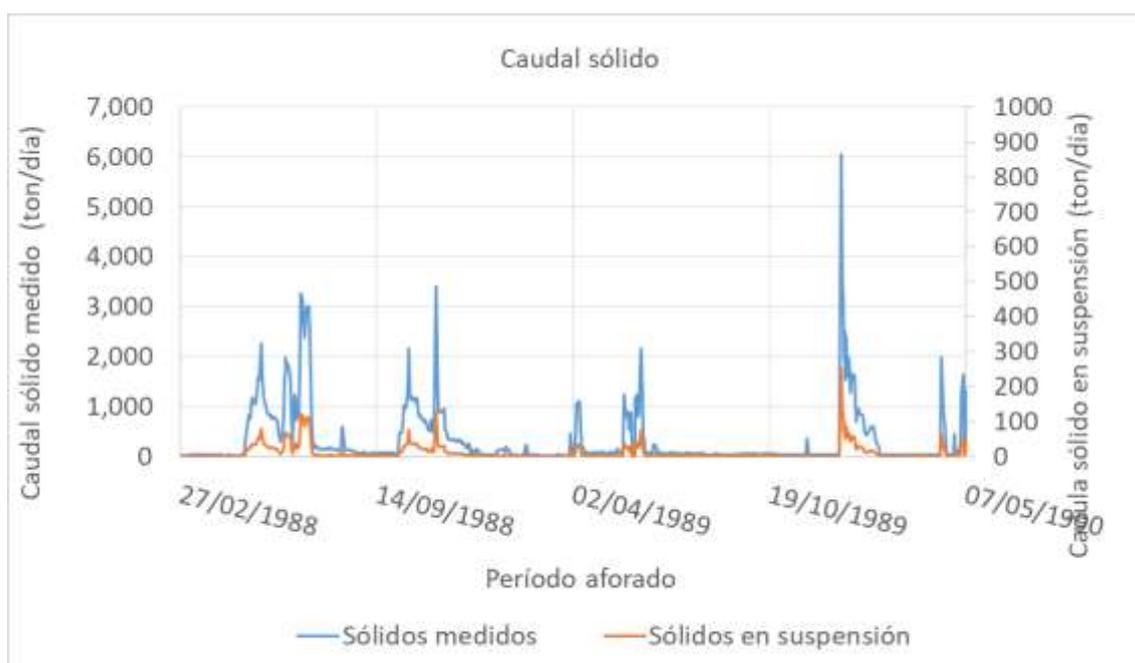


Figura 41. Serie de caudal sólido en el río Guadalope en Caspe

Tabla 22: Tasa anuales de sedimento transportado por el Guadalope en Caspe

Año	Tasa anual de sólidos medidos (Mt/año)	Tasa anual de sólidos en suspensión (Mt/año)
1988	0.682	0.021
1989	0.220	0.006
1990	0.276	0.008
Promedio	0.392	0.012

5.3 Aportaciones al embalse de Ribarroja

El embalse de Ribarroja recibe las aportaciones de las cuencas de los ríos Segre y Cinca. Se dispone de aforos sólidos en el río Cinca en Fraga (9017) y en el Segre en Seros (9025). Ribarroja también recibe las aportaciones del Matarraña, sin embargo no se dispone de los valores de sólidos medidos para esta estación que, por otra parte, tiene aportes menores en comparación con los ríos Cinca y Segre. La combinación de ambas estaciones proporciona una aportación media anual de sólidos medidos de 2.44 Mt/año y 0.33 Mt/año de sólidos en suspensión, como se detalla en los siguientes apartados. De acuerdo con esto, las aportaciones conjuntas de Cinca y Segre en la entrada de Ribarroja recibe aproximadamente la mitad de la aportación del Ebro en Mequinenza.

De acuerdo con el análisis realizado en el apartado 4, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0.55 Mt/año, valor que desciende prácticamente a mitad, 0.26 Mt/año en el período 2004-2016. En los años 80 y 90 esta tasa se estabilizó en 0.386 Mt/año. De acuerdo, con el estudio de Flumen (2007), la



retención de sedimento en el embalse es parcial, del 40.7% de las aportaciones, debido a sus dimensiones. Por tanto, la tasa de sedimento en la entrada se Ribarroja fué de 1.35 Mt/año, hasta 1980. Durante la década los 80 y 90 este valor se estabiliza en torno a 0.95 Mt/año, descendiendo a 0.64 Mt/año entre 2004 y 2016. Con estos datos el aporte de sedimento de las cuencas del Segre y Cinca supone entre el 15 y el 20% de la aportación del Ebro en Mequinenza, valores que concuerdan con la literatura técnica analizada.

Por tanto, las tasas de sedimento obtenidas de las mediciones de las estaciones de aforo infravaloran el de transporte de sedimento en suspensión.

5.3.1. Aportación de sedimentos del río Cinca en Fraga

Los registros de esta serie corresponden a 69 aforos realizados entre 1975 y 1990, con caudales comprendidos entre 272 m³/s y 15 m³/s.

Tabla 23: Aforos sólidos en Fraga (Cinca)

Fecha	Caudal (m ³ /s)	Carga de sólidos medidos (g/s)	Carga de sólidos en suspensión (g/s)
05/05/1975	50.68		3340.801
10/09/1975	48.3		6823.325
27/11/1975	26.11		2702.362
13/03/1976	56.18		4849.01
19/05/1976	34.59		6524.56
08/07/1976	32.6		9112.051
04/08/1976	19.01		1816.019
15/10/1976	73.94		11335
16/12/1976	78.62		2107
19/05/1977	129.63		62280
21/07/1977	142.86		6044
16/02/1978	55.45	25616	554.429
08/03/1978	158.47	57197	158470
12/04/1978	70.78	27416	3421
11/05/1978	116.87	51478	8937
20/09/1978	32.53		2052
19/10/1978	36.14	19759	1506
09/11/1978	29.07	14663	591.069
04/12/1978	37.35	22868	3259
09/01/1979	84.96	150785	100321
16/02/1979	272.73	114941	27939
08/03/1979	11.11	4324	189.774
21/11/1979	71.31	31154	777.624
11/12/1979	56.42	28287	1375
11/03/1980	48.06	21537	870.237
10/06/1980	48.65	35890	6214
07/07/1980	18.36	13820	1022
28/09/1980	55.68	42493	11534
14/10/1980	36.82	17945	1523
02/12/1980	50.63	21866	500.591
23/01/1981	21.28	12725	766.367
05/03/1981	21.71	16630	280.817
21/04/1981	35.31	26941	2965
23/06/1981	34.2	24565	2983



Fecha	Caudal (m ³ /s)	Carga de sólidos medidos (g/s)	Carga de sólidos en suspensión (g/s)
25/11/1982	73.93	31815	3502
24/03/1983	29.4	98212	1167.993
16/11/1983	61.91	46013	9351.392
21/12/1983	86.01	54961	7667.463
24/01/1984	34.13	27148	923.788
10/04/1984	82.33	37599	5137.388
11/05/1984	129.85	74406	10031.679
26/06/1984	83.63	52536	16079.349
25/09/1984	16.23	13524	727.08
29/10/1984	19.14	14325	443.487
19/11/1984	110.63	48618	6878.37
05/12/1984	115.62	40745	3036.243
22/01/1985	50.8	25736	981.944
26/02/1985	61.16	25499	1097
24/04/1985	71.57	46320	9244.5
22/05/1985	74.28	48377	7745
20/06/1985	55.29	29176	3025
04/07/1985	51.57	27929	2919
22/10/1985	14.98	13016	250.89
03/12/1985	17.79	10822	266.262
11/03/1986	53.65	21933	1546
22/04/1986	50.37	25277	2258
23/05/1986	147.25	73551	22306
11/06/1986	59.69	33128	2507
24/02/1987	28.11	18169	994.676
27/05/1987	36.62	26444	4430
15/12/1987	154.25	91038	14064
11/02/1988	138.04	63500	4140
18/04/1988	87.74	85.462	6233
15/02/1989	36.12	28506	802.109
11/05/1989	32.8	31319.2	2917.1
17/10/1989	15.65	17160.4	538.273
19/12/1989	101.96	177832.2	97180.6
15/02/1990	26.27	19239.3	1112.7
16/03/1990	17.72	17749	1016.7

Las figuras 42 y 43 muestran los ajustes obtenidos para las curvas que relacionan caudal líquido y caudal sólido y la reconstrucción de la serie de caudales sólidos del período 1975 a 1990. La tabla 24 presenta las aportaciones anuales de sedimento del Cinca en Fraga.

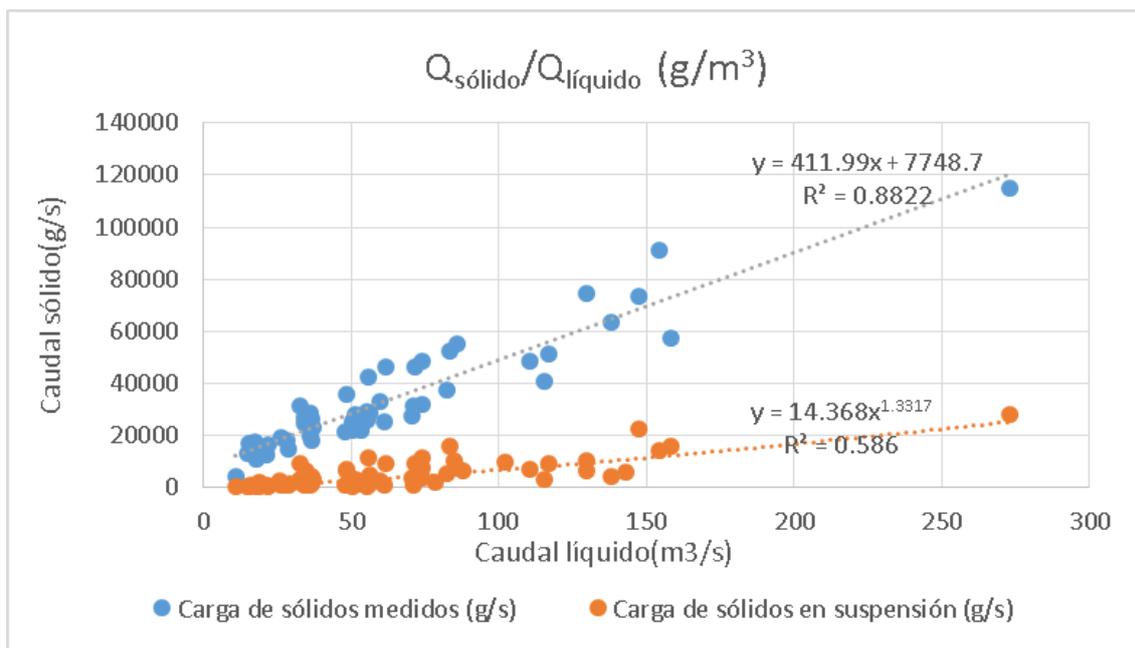


Figura 42. Ajuste de las relaciones de caudal líquido con los caudales sólidos

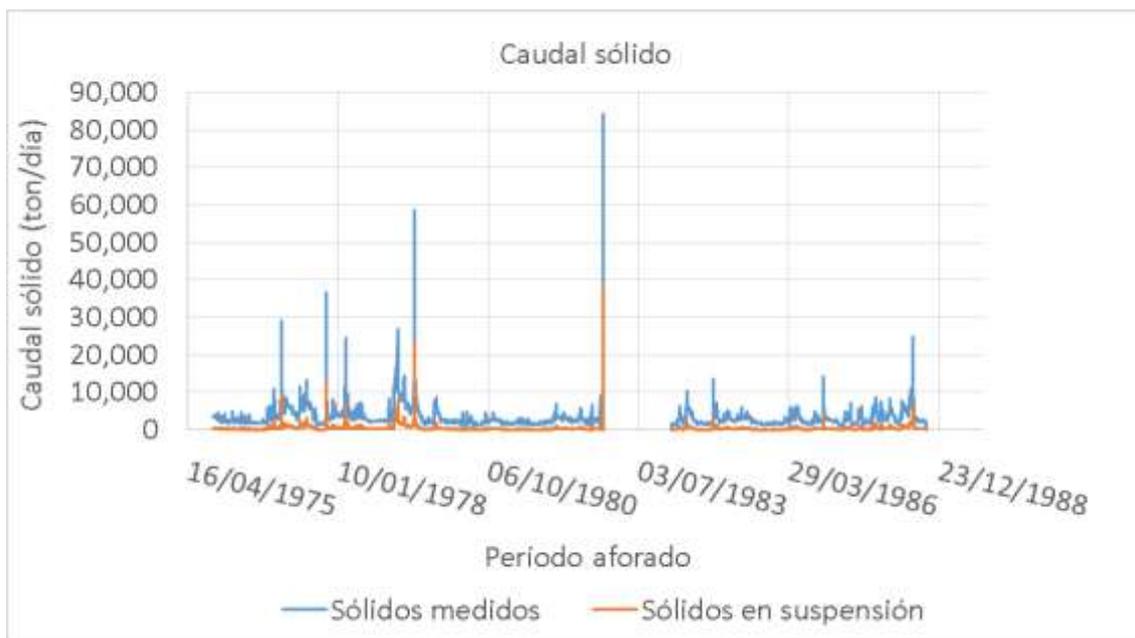


Figura 43. Serie de caudal sólido en el río Cinca en Fraga

Tabla 24: Tasa anuales de sedimento transportado por el Cinca en Fraga

Año	Tasa anual de sólidos medidos (Mt/año)	Tasa anual de sólidos en suspensión (Mt/año)
1975	1.11	0.12
1976	0.99	0.11
1977	1.88	0.31
1978	1.36	0.19
1979	2.09	0.38
1980	0.80	0.07
1981	0.73	0.06



Año	Tasa anual de sólidos medidos (Mt/año)	Tasa anual de sólidos en suspensión (Mt/año)
1982	0.89	0.15
1984	0.83	0.11
1985	0.92	0.09
1986	1.00	0.10
1987	1.03	0.12
1988	0.89	0.17
Promedio	1.12	0.15

5.3.2 Aportación de sedimentos del río Segre en Seros

Los registros de esta serie corresponden a 41 aforos realizados entre 1980 y 1989, con caudales comprendidos entre 186.38 m³/s y 7.27 m³/s.

Tabla 25: Aforos sólidos en Seros (Segre)

Fecha	Caudal (m ³ /s)	Carga de sólidos medidos (g/s)	Carga de sólidos en suspensión (g/s)
10/06/1980	146.75	46487	8919
07/07/1980	74.75	27731	2689
23/09/1980	74.51	31847	6590
14/10/1980	13.16		255.645
16/10/1980	8.61		268.067
02/12/1980	95.41	26109	1399
21/01/1981	32.92		509.142
28/01/1981	49.25	16377	962.019
04/03/1981	51.22	16934	1210
21/04/1981	68.42	37420	4237
23/06/1981	7.71	5144	199.327
25/11/1982	139.4	60741	15157
16/11/1983	76.32	47026	7501.888
21/12/1983	115.72	60563	11569.588
24/01/1984	46.89	24323	1240.116
10/04/1984	81.76	39290	4106.117
22/05/1984	186.38	84303	17416.199
26/06/1984	128.13	62701	25906.386
26/09/1984	84.86	30691	7685.276
30/10/1984	11.17	6644	654.873
22/11/1984	128.32	44128	7658.335
07/12/1984	158.74	44423	6085.491
22/01/1985	34.42	13205	919.999
26/02/1985	31.11	16470	378.198
23/04/1985	32.59	16567	1415
23/05/1985	121.98	54219	8767.194
19/06/1985	100.92	34893	4048.374
04/07/1985	95.56	40484	6321.99
22/10/1985	8.02	4919	70.251
03/12/1985	5.69	3553	46.49
11/03/1986	16.31	5188	413.135
22/04/1986	29.85	13462	875.839
20/05/1986	154.99	57661	20334.869
11/06/1986	7.27	3405	107.674
23/02/1987	14.63	8514	488.576
26/05/1987	74.27	23942.6	6042.7



Fecha	Caudal (m ³ /s)	Carga de sólidos medidos (g/s)	Carga de sólidos en suspensión (g/s)
16/12/1987	76.38	53131	4701.261
11/02/1988	50.41		2730
19/04/1988	87.58	42799.2	5574.5
15/02/1989	26.32	14535	850.088
17/10/1989	38.81	17870	1183

Las figuras 44 y 45 muestran los ajustes obtenidos para las curvas que relacionan caudal líquido y caudal sólido y la reconstrucción de la serie de caudales sólidos del período 1975 a 1990. La tabla 26 presenta las aportaciones anuales de sedimento del Segre en Seros.

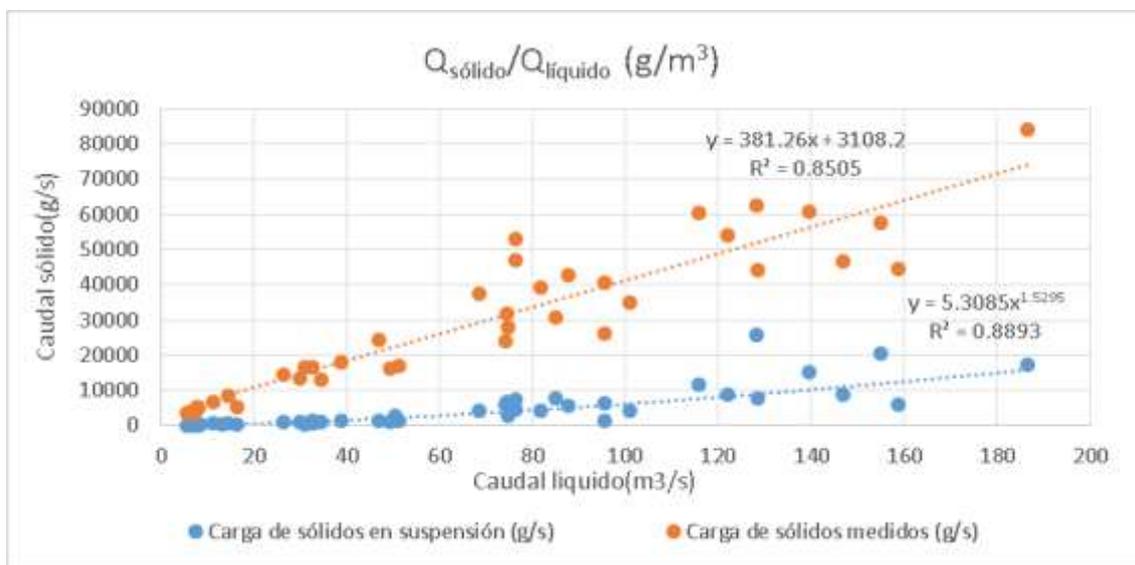


Figura 44. Ajuste de las relaciones de caudal líquido con los caudales sólidos

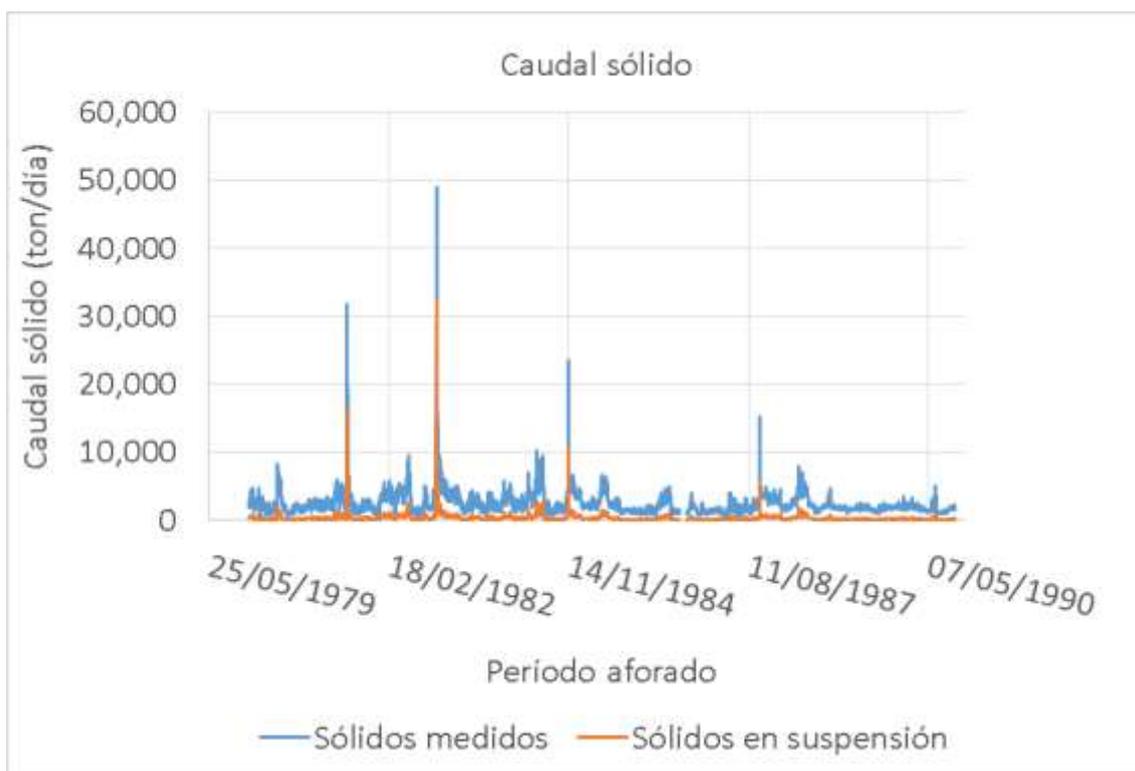


Figura 45. Serie de caudal sólido en el río Segre en Seros

Tabla 26: Tasa anuales de sedimento transportado por el Segre en Seros

Año	Tasa anual de sólidos medidos (Mt/año)	Tasa anual de sólidos en suspensión (Mt/año)
1980	0.80	0.10
1981	1.00	0.16
1982	1.47	0.31
1983	0.99	0.13
1984	1.18	0.20
1985	4.31	0.49
1986	0.59	0.06
1987	1.75	0.22
1988	0.64	0.06
1989	0.49	0.05
Promedio	1.32	0.18



6. INFLUENCIA DE LOS EMBALSES DE MEQUINENZA Y RIBARROJA EN LA DINÁMICA SEDIMENTARIA DEL CURSO BAJO DEL RÍO EBRO

En los apartados anteriores se ha analizado el transporte de sedimento aguas arriba de los embalses de Mequinenza y de Ribarroja. En el presente apartado va a realizarse una estimación de la evolución del tránsito sedimentario en el curso bajo del río Ebro desde 1967 hasta la actualidad, analizando la influencia que ha tenido la construcción de los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Para ello, se realizará en primer lugar una estimación del transporte de sedimentos que se tendría en la actualidad en la hipótesis de que no existieran estos embalses, seguida de un segundo análisis estudiando la situación actual, con los embalses en servicio.

Las tasas de transporte obtenidas de los aforos sólidos parecen menos consistentes que las resultantes de los estudios batimétricos. En consecuencia, para este análisis emplearemos las últimas.

La presa de Mequinenza retiene la totalidad de sedimentos que llegan a su embalse. Por tanto, el volumen retenido permite realizar un cálculo muy ajustado del volumen de sedimento transportado por la corriente del río Ebro. Con los datos de los reconocimientos batimétricos y las series temporales de caudal, se ha obtenido en el apartado 3.5, una relación lineal entre el caudal sólido y el caudal líquido de $0.6 \cdot 10^{-3}$, que reproduce el proceso de sedimentación del embalse (figura 27). Este ajuste nos permite generar la ley de caudal sólido en la ubicación de Mequinenza.

Aunque se ha realizado el mismo cálculo en el embalse de Ribarroja, la incertidumbre sobre la validez de la serie generada de caudal sólido es algo mayor, pues solamente se dispone de una batimetría del año 2007, y la retención de sedimento es parcial. El estudio de Flumen de 2009 aporta el dato de un 40.7% de retención.

Combinando las dos series se ha obtenido la serie de caudal sólido aguas abajo de Ribarroja en dos escenarios, considerando o no la no existencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja.

6.1. Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo del Ebro sin embalses

La serie de caudales combinada se ha generado desde 1967 hasta 2016. En este período la aportación media diaria del río Ebro aguas abajo de Flix es de $33.36 \text{ hm}^3/\text{día}$. La serie de caudales sólidos del Ebro aguas arriba de Mequinenza se ha obtenido con la relación obtenida en 3.5:

$$\frac{Q_{\text{sólido}}}{Q_{\text{líquido}}} = 0.6 \cdot 10^{-3}$$

La serie de caudales sólidos aguas arriba de Ribarroja se obtenido, considerando el coeficiente sedimentación correspondiente al valor medio ($0.0741 \cdot 10^{-3}$), de acuerdo con la horquilla de sedimentación que proporcionaba el estudio batimétrico de 2007. Considerando que solamente se retiene el 40% de la aportación sólida, se ha

incrementado este coeficiente para que represente la carga total de la aportación y no solo la de la parte sedimentada:

$$\frac{Q_{\text{sólido}}}{Q_{\text{líquido}}} = \frac{0.0741 \cdot 10^{-3}}{0.4} = 0.185 \cdot 10^{-3}$$

La aportación sólida media resultante aguas abajo de la confluencia de los ríos Ebro y Segre es de 14700 m³/día. La figura 46 muestra las aportaciones de sedimento acumuladas y referidas al caudal sólido medio. Se aprecia que el transporte de sedimentos era mucho mayor, en las décadas de los años 60 y 70, se estabiliza en los años 80, y desciende desde entonces hasta la actualidad, en un ritmo sostenido. La figura 46 muestra el ajuste lineal que proporciona un caudal de 19700 m³/día. En el período 1986-2016 el caudal sólido medio es de 12600 m³/día (figura 47).

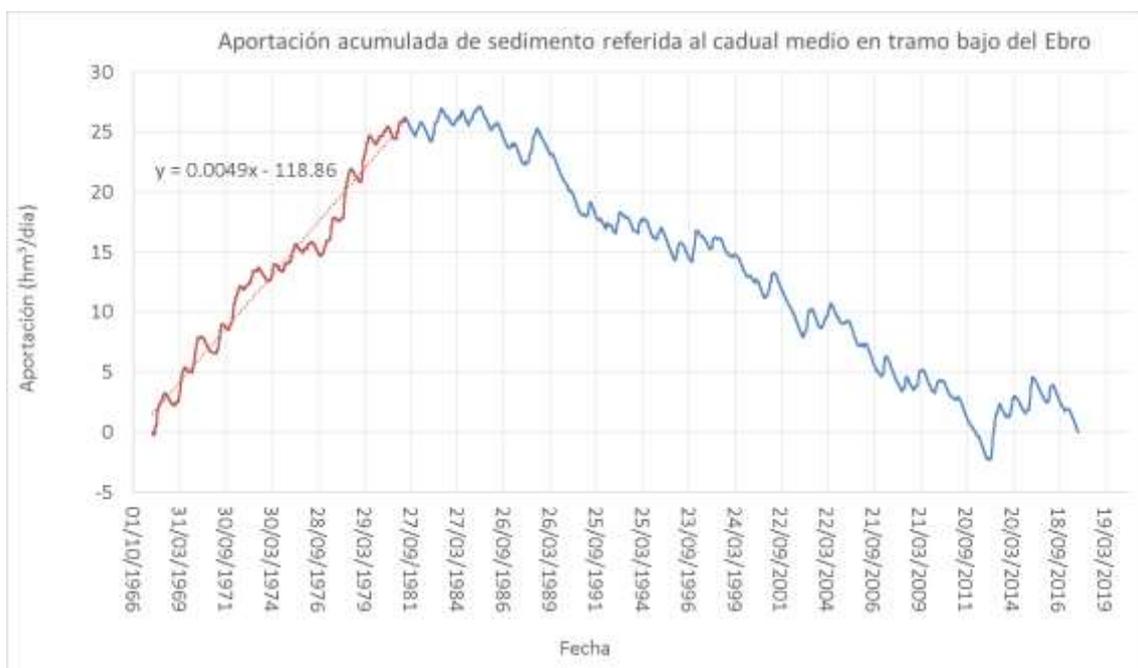


Figura 46. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario sin embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1967-1981



Figura 47. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario sin embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1986-2016

De acuerdo con lo anterior se ha obtenido la tabla 27, que indica las tasas de transporte de sedimento que se habrían producido en el curso bajo del río Ebro desde 1967 a 2016 de no existir los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix.

Tabla 27: Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo sin embalses

Período	Caudal sólido medio (m³/día)	Tasa volumétrica (hm³/año)	Tasa de transporte (Mt/año)
1967-1981	19700	7.17	8.08
1986-2016	12600	4.58	5.16

Varela y otros (1986) estiman que el año 1964 el aporte de sedimentos, a la altura de Fix era del orden de 8,7 Mt/año, valor que concuerda con los resultados obtenidos en este estudio.

En caso de no existir embalses, en la actualidad el tramo bajo del río Ebro transportaría 5.16 Mt/año, más los aportes menores de las cuencas del tramo bajo.

6.2. Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo del Ebro con embalses

En la situación real, con los embalses de Mequinenza y Ribarroja en servicio, el cálculo de la aportación de sedimento se ha realizado considerando que Mequinenza retiene la totalidad del sedimento aportado por el Ebro, por lo que el único sedimento circulante por el cauce en Flix, será el que no es retenido en Ribarroja, es decir, el 60% de las aportaciones conjuntas de los ríos Cinca y Segre. La figuras 48 y 49 muestran la aportación de sedimento acumulada referido al caudal medio del tramo



bajo del río Ebro, que de este cálculo resulta ser de 1411.5 m³/día. El caudal medio de sedimento en el período 1967 a 1981 fue de 2111.5 m³/día (figura 48), que equivale a 0.827 Mt/año, mientras que el período de 2004 a 2016 es de 0.375 Mt/año (figura 49), menos de la mitad que en los años 70. De acuerdo con esto, se estima que en la actualidad la aportación de sedimento de río Ebro al delta será de 0.375 Mt/año, más las aportaciones de las pequeñas subcuencas del tramo bajo. La tabla 28 resume estos resultados.

Tabla 28: Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo con embalses

Período	Caudal sólido medio (m ³ /día)	Tasa volumétrica (hm ³ /año)	Tasa de transporte (Mt/año)
1967-1981	0.0020	0.7342	0.8270
1986-2016	0.0009	0.3327	0.3747



Figura 48. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario con embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1967-1981



Figura 49. Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario con embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1986-2016



7. ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS

Como resultado del análisis realizado en los apartados 3 a 6, se ha comprobado la necesidad de realizar estudios complementarios que permitan validar los análisis realizados en el presente trabajo así como para dar respuesta a las cuestiones pendientes.

En concreto, los principales estudios complementarios que se considera necesario abordar, junto con su justificación, son los siguientes:

1. La realización de un estudio batimétrico completo del embalse de Mequinenza, permitiría comprobar el volumen real de sedimento retenido en el embalse, y además determinar las tasas de transporte reales de la cuenca del Ebro, aguas arriba de Mequinenza.
2. Un nuevo estudio batimétrico de Ribarroja permitiría actualizar la sedimentación del embalse y ajustar las tasas de transporte.
3. Se carece de estudios sedimentológicos de los embalses de Mequinenza y Ribarroja, que permitan caracterizar con precisión los sedimentos retenidos.



8. CONCLUSIONES

El objeto del presente documento es analizar el transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro, con especial atención a la influencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja y la caracterización de los sedimentos existentes en ellos. A tal fin, se ha recopilado y analizado la información disponible. Aunque resulta necesario realizar estudios complementarios, los datos disponibles han permitido realizar nuevos análisis como consecuencia de los cuales, se han alcanzado las siguientes conclusiones:

Respecto al embalse de Mequinenza:

1. La capacidad inicial del embalse de Mequinenza, hasta la cota 121.15 msnsm se ha reevaluado en 1483.29 hm³ (frente a los 1530 hm³ teóricos) Este valor se ha obtenido vectorizando las curvas de nivel de una digitalización de alta resolución facilitada por la CHE, de la topografía realizada en 1961 en el trabajo “Salto de Mequinenza: Concesión del aprovechamiento del río Ebro y afluentes” (Expediente CHE1957-A60), que utilizó el levantamiento topográfico a escala 1:5.000 de toda la zona del embalse apoyado en una triangulación general realizada por el Instituto Geográfico Nacional.
2. Las grandes dimensiones del embalse de Mequinenza, 108 km de longitud y 1483.29 hm³ de capacidad, lo convierten en una barrera que retiene la totalidad del sedimento que llega al embalse por arrastre de fondo y en suspensión. Además, se deposita una parte de los sólidos disueltos.
3. En cuanto al volumen de sedimentos acumulados en el embalse de Mequinenza, en el año 1982 los estudios batimétricos del CEDEX lo estimaba en 95 hm³ y en el presente informe se ha calculado que en 2012 ascendería a 211 hm³ y en la actualidad (2020) estaría en una horquilla entre 242 hm³ (calculado a partir de los valores de las tasas de aportación de sedimentos estimadas) y 244,9 hm³ (calculado mediante un ajuste hidrológico)
4. Las tasas de aportación de sedimentos al embalse de Mequinenza se estiman en este informe en 6,68 Mt/año en el periodo de 1966 a 1982 y en 4,37 Mt/año entre 1982 y 2012
5. La aportación media de la cuenca del Ebro en Mequinenza desde su puesta en explotación hasta la actualidad, es de 21.1 hm³/día. Este valor era de 27.2 hm³/día hasta el año 1982 donde se aprecia un acusado cambio de tendencia. Desde 1985 hasta la actualidad la aportación media se ha reducido a 17.7 hm³/día. La menor aportación de la cuenca en el período 1982-2012 frente al anterior (1969-1982) hace que la tasa retención haya descendido notablemente.
6. En el año 1982 se habían acumulado 95.42 hm³, 37.92 hm³ de los cuales se acumularon en los últimos 42 km del embalse. La tasa anual de sedimento retenido en el embalse en este período fue de 5.96 hm³/año, que con una densidad media del sedimento de 1126.36 kg/m³, resulta 6.7 Mt/año.



7. En el lapso de tiempo de 30 años, desde 1982 a 2012, se acumularon en los últimos 42 km de la cola del embalse 46.28 hm³, totalizando 84.21 hm³, desde 1966 hasta 2012. Se estima que el resto del embalse de Mequinenza se depositaron 73.97 hm³, totalizando 116.25 hm³ en el período 1982-2012. Si acumulamos a estos sedimentos los 95.42 hm³ del periodo anterior a 1982, totalizan 211.67 hm³.
8. La actual tasa de sedimentación del embalse de Mequinenza se estima en 4.36 Mt/año, equivalente a 3.87 hm³/año.
9. Los sondeos realizados entre los PK 72 y 90 en 2012 han permitido caracterizar el sedimento en este tramo de embalse. Se calcula que de los 40.2 hm³ de sedimento que existen en este tramo, 20.05 hm³ son de arena y 5.64 hm³ son de grava.

Respecto al embalse de Ribarroja:

10. El embalse de Ribarroja regula las aportaciones de los ríos Cinca y Segre. Su aportación media desde 1967 a 2016 es de 12.69 hm³/día. Se aprecia, como en el caso de Mequinenza, un cambio de tendencia en la evolución de las aportaciones, aunque en este caso se identifica una “meseta” más amplia durante las décadas de los años 80 y 90. El caudal medio del período 1967-1980 era 17.71 hm³/día, mientras que en el período 2004-2016 es de 8.25 hm³/día
11. La batimetría de 2007 incluida en el “*Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja*” (Grupo Flumen, 2009) indica que el volumen de sedimento retenido estaba en esa fecha entre 13 y 16.6 hm³.
12. Los estudios realizados en el presente informe permiten estimar que en la actualidad (2020) la sedimentación de Ribarroja esté entre 15 y 19.3 hm³.
13. Partiendo del valor medio del rango de sedimentación, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de 0.55 Mt/año, valor que desciende prácticamente a mitad, 0.26 Mt/año en el período 2004-2016.
14. No se dispone de información sedimentológica que permita caracterizar el sedimento del embalse.

En cuanto al tránsito de sedimentos en el curso bajo del Ebro:

15. Se ha realizado un análisis con los registros de aforo sólidos elaborados por el CEDEX hace años en numerosas estaciones de muestreo para obtener las tasas de aporte de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja, si bien los resultados obtenidos deben manejarse con precaución, ya que estos registros infravaloran el transporte de sedimento en suspensión en comparación con los valores obtenidos de los estudios batimétricos de los embalses.



16. Respecto al tránsito de sedimento en el curso bajo sin la existencia de Mequinenza y con los cálculos realizados en el presente informe se concluye que, de no existir los embalses de Mequinenza y Ribarroja, la tasa de transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro habría sido de 8.8 Mt/año en el período 1967-1982, valor que habría descendido desde 1986 hasta la actualidad a 5.16 Mt/año. A estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.

17. En el presente informe se estima que en la actualidad (2020) la tasa de transporte de sedimentos en suspensión aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Ribarroja y Flix es de 0.37 Mt/año (durante los primeros años de tras la puesta en explotación de las presas era de 0.83 Mt/año). Al igual que en el caso anterior, a estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.

18. En la actualidad todo el material de arrastre de fondo de la cuenca del Ebro aguas arriba de Mequinenza, y de las cuencas de los ríos Cinca y Segre, queda retenido en la cola de los embalses. El único sedimento que sale de Mequinenza es el disuelto, que no tiene ninguna influencia en la dinámica sedimentológica del curso bajo. El único sedimento en suspensión que circula por el Ebro a la altura de Flix, es el no retenido en Ribarroja que se estima en un 60% de las aportaciones conjuntas de las cuencas del Cinca y del Segre.



9. REFERENCIAS

- ACA (2009). *“Balance de sedimentos del tramo final del río Ebro. Documento preliminar”*. Agencia Catalana del Agua, enero 2009.
- Bayerri (1935). *“Historia de Tortosa y su comarca”*. Imprenta moderna del Aguerri. Tortosa.
- Balada, R., A. Espanya, A. Martinez Vilalta, J. Martí, I. Juan, A. Canicio y X. Ribas, (1997). *“El Delta del Ebro”*. Ediciones Jaguar. Libro editado en colaboración con Diputación de Tarragona.
- Catalán (1969). *“Química del agua”*. Editorial Blume.
- CEDEX (1971). *“Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-Octubre de 1970”*. Informe Técnico para la Dirección General de Obras Hidráulicas. Centro de Estudios Hidrográficos, 1971.
- CEDEX (1982). *“Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza”*. Informe técnico para la Dirección General Obras Hidráulicas. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- CEDEX (2002) *“El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro”*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Centro de Estudios Hidrográficos. Inédito.
- Control de obra Civil (2011). *“Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza”*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro”. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Control de obra Civil (2012). *“Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza”*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- ECOHYDROS (2008). *“Aplicación de tecnologías acústicas en la detección y evaluación de poblaciones de peces y mejillón cebrá en los embalses de la cuenca del Ebro”*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Gorría (1877). *“Desecación de las marismas y terrenos pantanosos denominados de Los Alfaques”*. Ministerio de Agricultura.
- Grupo Flumen (2009). *“Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja”*. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Guillén, J. y Palanques, A. (1992). *“Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River”*. Sedimentology 39, 567-579. Guillén, J., Díaz, J.I.
- Guillén, J., Díaz, J.I. y Palanques, A. (1992). *“Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo en el río Ebro al medio marino”*.
- Ibàñez C, Canicio A, Day JW, Curcó A (1997): *“Morphologic development, relative sea level rise and sustainable management of water and sediment in the Ebre Delta, Spain”*. Journal of Coastal Conservation 3, pp 191-202.



Lechuga, A., López, J.A. (1997). “*Evolución reciente del Delta del Ebro. Aportes de sedimentos por el río. El oleaje y el transporte sólido litoral*”. Revista de Ingeniería Civil, 164, pp 99-107. CEDEX.

Palanques, A. (1992). “*Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo en el río Ebro al medio marino*”

DGPC (1978). Plan Indicativo de Usos del Dominio Público Litoral del Delta del Ebro (1978). Dirección General de Puertos y Costas. MOPU.

Palanques (1987). “*Dinámica sedimentaria, mineralogía, y micro-contaminantes inorgánicos de las suspensiones y de los sedimentos superficiales en el margen continental del Ebro*”. Tesis Doctoral, UPC.

Sanz Montero, M.E.; Avendaño Salas, C.; Cobo Rayán, R. (2001). “*Influencia del complejo de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix (río Ebro) en la morfología del cauce situado aguas abajo*”. Revista de la Sociedad Geológica de España, 14(1-2), pp 3-17

Serra, J., Colombo, F., Canals, M. y Guillén, J. (1990). “*Comportamiento hidráulico y sedimentario del río Ebro, entre Tortosa y Amposta (Tarragona, España)*”. Geogaceta, 8: 107-109.

Tena A, Batalla RJ, Vericat D (2012). “*Reach-scale suspended sediment balance downstream from dams in a large Mediterranean river*”. Hydrological Sciences Journal 57, pp 1–19.

Tena, A., Batalla, R.J. (2013). “*The sediment budget of a large river regulated by dams (The lower River Ebro, NE Spain)*”. Journal of Soils and Sediments 13, pp 966–980.

TRAGSATEC (2012). “*Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008*”. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.

UPM (2018). “*Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix*”. Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro. Fundación Agustín de Betancourt (Profesor responsable D. Luis Garrote de Marcos).

Varela, J.M., A. Gallardo y A. López de Velasco, 1986. Retención por los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Efectos sobre los aportes al delta del Ebro. Sistema integrado del Ebro. M-G. Mariño, ed. Gráf. Hermes, 203-219.



ANEXO 1

Apartado 1.8.4 “Aportes sólidos en el Delta” del informe

**“El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro”. CEDEX
(2002), inédito**



El aporte de sólidos en la desembocadura del río Ebro, además del régimen de crecidas del río, es función de cómo se produce la erosión en la cuenca, de las retenciones de los sedimentos en los embalses y de la capacidad para el transporte de material sólido de los cauces.

La erosión en las cuencas ocurre principalmente durante las crecidas de los ríos y con una mayor facilidad y rapidez en aquellas zonas donde el suelo se encuentra más desprotegido por tener una menor cobertura vegetal.

No todo el material erosionado en la cuenca es transportado a través del sistema fluvial y entregado al mar. La tasa a la cual se vierte el sedimento al mar suele ser un porcentaje reducido (menor de un cuarto según algunos investigadores) de la tasa a la que se erosiona de la superficie del terreno. El resto del material se deposita en aquellas zonas donde la energía de la corriente no es capaz de mantener el transporte. La sedimentación ocurre en tramos de baja pendiente de los cauces, en las llanuras de inundación, al producirse el desbordamiento en los cauces, y también en los embalses, donde se retienen cantidades importantes de material sólido.

El transporte de material sólido en los cauces puede producirse básicamente de dos formas: por arrastre de fondo y en suspensión. El transporte por arrastre afecta al sedimento de mayor tamaño que viaja por el fondo del cauce. Este transporte no suele llegar a la desembocadura del río en porcentajes significativos y, en una primera aproximación, podría considerarse que los sólidos en suspensión en el tramo final del Ebro deberían ser del orden de los aportes sólidos totales.

Si se quiere estudiar el problema actual de la falta de aportes sólidos en la desembocadura del Ebro es obligado hacer un cierto análisis histórico de la evolución del transporte sólido en el río.

En Balada y otros (1997) se indica que a finales del siglo pasado el delta recibía un caudal sólido del orden de 30-70 millones de metros cúbicos anuales. Según Bayerri (1935) a comienzos del siglo XX pasaban a la altura de Tortosa entre 15 y 20 millones de toneladas de aportes sólidos al año. Palanques y Guillén (1992) refieren que existen medidas de finales del siglo XIX y principios del XX según las cuales la concentración de sólidos en suspensión en el tramo final del río oscilaba entre 700 y 1.700 mg/l y que podía llegar a sobrepasar los 10.000 mg/l durante las avenidas. Según estas cifras y considerando la aportación anual del río, podría estimarse que el Ebro desaguaba al mar entre 13 y 30 millones de toneladas anuales de material sólido en suspensión. Otra estimación reciente evalúa el transporte sólido a principios del siglo XX en 30 millones de toneladas anuales (Ibáñez y otros, 1996).

Hasta la década de los sesenta no se realizan nuevas determinaciones de los aportes sólidos. En esas fechas Catalán (1969) estima que, para el periodo 1961-63, los sedimentos transportados a la altura de Flix eran de 2,2 millones de toneladas anuales. Por otra parte, Varela y otros. (1986) estiman para el año 1964 un aporte de sedimentos, en el mismo punto, del orden de 8,7 millones de toneladas anuales. Ambas estimaciones suponen una reducción importante respecto de los valores calculados para finales del siglo XIX y comienzos de siglo XX, lo que se explica por la falta de crecidas de magnitud extraordinaria en esos años y por la ya elevada capacidad de embalse existente en la cuenca (unos 3,5 km³, lo que representa del orden de la mitad de la actual).



Los siguientes datos disponibles sobre aportes sólidos corresponden a la década de los ochenta, cuando ya se encuentran en funcionamiento prácticamente todos los embalses que hoy existen en la cuenca. Palanques (1987) estima, para el periodo 1983-86, un valor en la desembocadura de 0,15 millones de toneladas anuales, mientras que Guillén y otros (1992) obtienen, en el mismo punto y para el periodo 1988-90, una cifra ligeramente inferior de 0,12 millones de toneladas anuales.

En la figura A1 se muestran los datos anteriores junto con un indicador de las crecidas del río (años con caudales superiores a 3.500 m³/s) y la capacidad de almacenamiento en la cuenca desde mediados del siglo XIX, observándose que se produce claramente una reducción de los aportes sólidos al disminuir la magnitud de las crecidas y aumentar la capacidad de embalse.

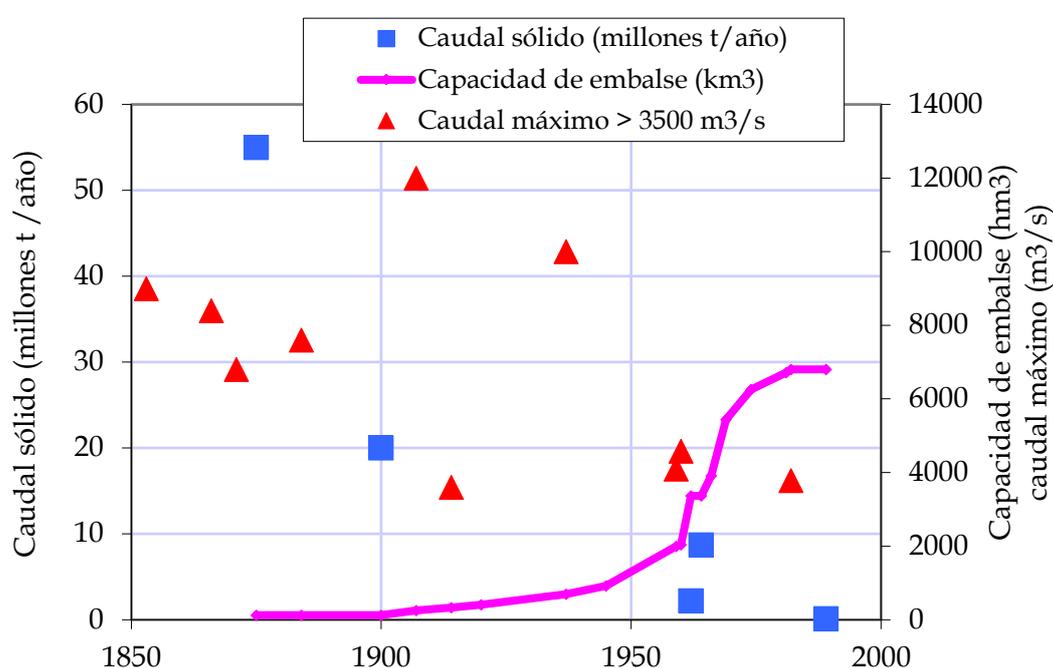


Figura A1. Evolución de las crecidas, los almacenamientos en los embalses y los aportes sólidos en la desembocadura del Ebro

En cuanto al transporte por arrastre de fondo en el tramo final del Ebro, Guillén y otros (1992) indican que fue prácticamente nulo en el periodo 1988-1992, debido a las retenciones que suponen los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Según Guillén y otros (1992) el tramo de cuenca inferior al embalse de Ribarroja aporta a la desembocadura entre 1.600 y 33.000 toneladas anuales de arrastre de fondo.

Los sólidos en suspensión transportados en la actualidad por el Ebro en el Delta son los no retenidos en los embalses (básicamente cuando se producen vertidos en situaciones de crecida), los procedentes del propio cauce y los aportados por la pequeña subcuenca del Ebro aguas abajo de los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Uno de los factores principales que contribuye a la aportación sólida es el propio cauce del río aguas abajo de los embalses, donde se está produciendo una cierta degradación de las márgenes al ser mayor la capacidad erosiva de las aguas por la menor concentración de sedimentos.



Es ciertamente importante disponer de estimaciones de los aportes sólidos del río tanto en la situación natural o de referencia, como en la situación actual con los embalses existentes en la cuenca. Habitualmente se utilizan dos procedimientos para realizar estas estimaciones: a) determinar los aportes sólidos generados en las cuencas controladas por los embalses como los aterramientos producidos entre dos fechas, los cuales pueden obtenerse comparando batimetrías y b) determinar los sólidos en suspensión a partir de curvas que relacionan los caudales líquidos y sólidos y de las series continuas de caudales líquidos.

Estos dos procedimientos se han aplicado a continuación con objeto de tener una nueva estimación de los aportes sólidos de la cuenca Ebro para las situaciones actual y de referencia.

a) Estimación de aportes sólidos a partir de los aterramientos en los embalses

El CEDEX ha determinado mediante batimetrías el aterramiento medio anual en una serie de embalses de la cuenca del Ebro (tabla A1) y ha realizado también diversos estudios sobre la granulometría de los sedimentos de los embalses (tabla A2).

Tabla A1. Aterramientos anuales en los embalses de la cuenca del Ebro. Fuente: Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX

Embalse	Año construcción	Vol. inicial (hm ³)	Año estudio	Vol. actualizado (hm ³)	Aterramiento anual (m ³ /año)	Densidad (kg/m ³)	Aterramiento anual (t)
Argüís	1938	3,0	1980	2,2	18.048	1126,360	20.329
Barasona	1932	71,0	1993	46,2	405.967	1112,000	451.435
Cueva Foradada	1926	28,7	1992	22,1	100.258	1100,000	110.284
Gallipuen	1927	4,0	1999	3,7	4.264	1123,260	4.790
Mediano	1959	438,0	1996	425,9	328.297	1035,000	339.787
Mequinenza	1966	1530,0	1982	1437,2	5.801.375	1126,360	6.534.437
Moneva	1929	8,0	1999	7,4	8.986	1126,360	10.121
Oliana	1959	101,0	1985	85,8	583.846	1075,000	627.634
Ribarroja	1969	219,0	1982	206,8	940.308	1126,360	1.059.125
Sta. María de Belsue	1931	13,0	1980	11,3	35.551	1152,900	40.987
Santolea	1932	48,9	1993	47,7	19.475	1109,500	21.608
Sotonera	1963	189,0	1986	181,7	316.870	1107,300	350.870
Talarn o Tremp	1916	258,0	1990	188,4	940.432	1126,360	1.059.265
Yesa	1960	471,0	1986	450,2	799.231	1044,640	834.909

Tabla A2. Granulometría del sedimento en los embalses (se ha adoptado el siguiente criterio en cuanto a escala de tamaños y nomenclatura: diámetros menores de 0,004 mm les denomina arcilla, entre 0,004 mm y 0,064 mm limo, y entre 0,064 y 2 mm arena). Fuente: Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX

Embalses	% arena	% limo	% arcilla	Margen
Cueva Foradada	5,49	66,33	28,17	Der
Santolea	5,70	68,68	25,63	Der
Tranquera La	20,39	59,48	20,13	Der
Gallipuen	36,44	44,81	18,76	Der
Sotonera	10,08	64,19	21,25	Izq
Sta M ^a de Belsué	13,18	70,11	16,71	Izq
Mediano	8,29	54,66	37,05	Izq



Embalses	% arena	% limo	% arcilla	Margen
Olíana	8,80	59,20	32,00	Izq
Peña	3,24	77,37	19,39	Izq
Yesa	4,02	66,36	29,62	Izq
Barasona	7,57	65,87	26,56	Izq

Aunque hay que tomar con cierta precaución las cifras de la tabla 4 por la incertidumbre que tiene el cálculo de sedimentos por diferencia de batimetrías, es evidente que los datos indican que se han producido aterramientos significativos en todos los embalses de la cuenca. En el embalse de Mequinenza los aterramientos casi alcanzan los 7 millones de toneladas anuales y ello a pesar de que el periodo de análisis corresponde a unos años donde sólo se produce una única crecida extraordinaria, en el año 1982.

Por otra parte, la observación de la tabla A2 indica que el porcentaje de arenas es inferior al 10 % en la mayoría de los embalses. También se observa que no se han realizado por el momento estudios sedimentológicos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja, y por tanto se desconocen las distribuciones granulométricas de sus aportes sólidos.

A partir de los datos de aterramientos medios anuales de la tabla A1 y de la superficie de la cuenca de influencia de los embalses, se puede calcular el aterramiento anual por unidad de superficie en la cuenca vertiente a cada embalse (tabla A3) y elaborar un mapa estimativo, mediante interpolación de esos datos puntuales, de los aportes sólidos generados en cada punto de la cuenca (figura A2).

Tabla A3. Aterramiento anual por unidad de superficie en las cuencas de influencia de los embalses

Embalse	Superficie de la cuenca De influencia (km²)	Aterramiento anual por unidad de superficie (tn/ ha/ año)
Argüis	41	4,96
Barasona	1.499	3,01
Cueva Foradada	669	1,65
Gallipuen	142	0,34
Mediano	1.782	1,91
Mequinenza	43.400	1,51
Moneva	470	0,22
Olíana	2.694	2,33
Ribarroja	11.110	0,95
Sta. María de Belsue	190	2,16
Santolea	1.236	0,17
Sotonera	2.379	1,47
Talarn o Tremp	2.068	5,12
Yesa	2.190	3,81

En la margen izquierda del río Ebro se generan más aportes sólidos por unidad de superficie que en la derecha, moviéndose en los rangos de 1 a 5 toneladas/ha/año en la izquierda y de 0,2 a 1,5 toneladas/ha/año en la derecha. Estas cifras de aportes por unidad de superficie son bastante consistentes entre sí e indican que el cálculo de los sedimentos por diferencia de batimetrías puede considerarse razonable en una aproximación como la objeto de este apartado.

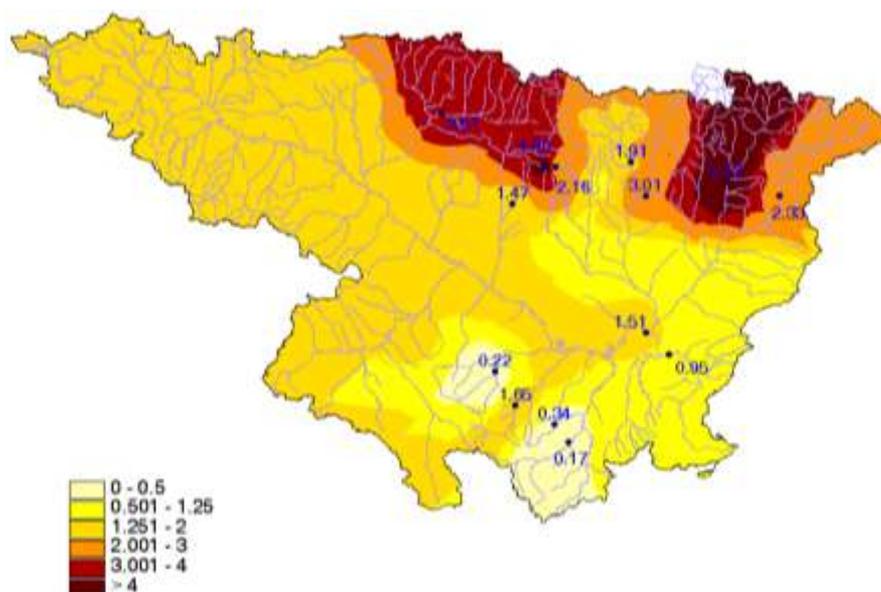


Figura A2. Aportes sólidos por unidad de superficie (toneladas/ha/año) generados en la cuenca del Ebro

Si se asume que todos los aportes sólidos retenidos en los embalses hubiesen llegado a la desembocadura caso de no existir éstos, lo que puede considerarse razonable pues la fracción limoso-arcillosa representa más del 90 % de los sedimentos retenidos en los embalses, puede estimarse, en una primera aproximación, cuáles serían los aportes sólidos producidos en el periodo en el que se dispone de batimetrías. Este periodo no es homogéneo, aunque podría aproximadamente asumirse que corresponde a la segunda mitad del siglo XX.

Bajo la hipótesis anterior se ha realizado la integración de los valores reflejados en el mapa de aportes de la figura A2 en puntos significativos de la cuenca del Ebro. Para el cálculo de los aportes correspondientes al régimen actual se ha hecho la hipótesis de que los embalses retienen todos los aportes sólidos que reciben desde aguas arriba.

Tabla A4. Aportes sólidos (Mt/año) en las principales cuencas en el régimen de referencia y real.

Cuenca	Régimen de referencia	Régimen actual
Río Ebro en Mequinenza	9,26	6,86
Río Segre	4,94	1,15
Río Ebro en Ribarroja	14,41	1,35
Río Ebro en Tortosa	14,62	0,21

Según estos cálculos los aportes sólidos en la situación hipotética de que no existiesen embalses serían del orden de 14 millones de toneladas/año, cifra que se encuentra en el límite inferior de las distintas estimaciones realizadas para comienzos del siglo XX. Esto se explica porque en el periodo considerado para el cálculo de los aportes se han producido muy pocas crecidas extraordinarias.

De esos 14 millones de toneladas/año, unos 9 millones corresponderían a la cuenca del Ebro en el punto en donde se sitúa el embalse de Mequinenza y del orden de 5 millones a la cuenca del Segre. Los aportes generados por unidad de superficie en la cuenca del Segre serían por tanto más del doble de los generados



en la cuenca del Ebro vertiente a Mequinenza, lo tiene su explicación en la mayor magnitud de las crecidas del Segre en comparación a las del resto de la cuenca.

En la situación actual los aportes sólidos estimados en Tortosa son del orden de 0,2 millones de toneladas /año, cifra que ajusta bien con las estimaciones realizadas por otros autores para la situación actual. Los aportes sólidos en el embalse de Mequinenza están próximos a los 7 millones de toneladas/año, mientras que los que recibe el embalse de Ribarroja, y que provienen fundamentalmente de la cuenca no controlada del Segre, son del orden de 1,35 millones de toneladas/año. Según estas cifras, de los aportes sólidos que llegan al complejo de embalses de Mequinenza y Ribarroja, algo más del 80% procede del río Ebro y algo menos del 20% del Segre.

b) Estimación de los aportes de sólidos en suspensión a partir de aforos de caudales líquidos y sólidos

Los sólidos en suspensión en un tramo de río están muy relacionados con los caudales que por él circulan y es habitual establecer curvas que los relacionan en situaciones de invarianza en las características de las cuencas y de los embalses. Estas curvas suelen ser del tipo:

$$Q_s = aQ^b,$$

donde Q_s son los sólidos en suspensión en g/s, Q es el caudal líquido en m³/s, y “a” y “b” son constantes, que varían en función de las características físicas, climáticas e hidrológicas de la cuenca.

El empleo de este procedimiento para el cálculo de sólidos en suspensión presenta una serie de problemas que han sido señalados por distintos autores. La dinámica sedimentaria del río Ebro, al igual que en muchos otros ríos, viene controlada por las avenidas extraordinarias y por tanto la mayor parte del aporte de sedimento que llega al delta del Ebro se produce durante eventos muy energéticos de carácter esporádico. Consecuentemente, el problema más importante suele estar asociado al reducido número de aforos sólidos disponible para los eventos de crecida, lo que impide ajustar y validar la ecuación referida en los tramos de aguas altas. La falta de aforos sólidos en estas situaciones se explica por la dificultad de realizar aforos sólidos en situaciones de crecida.

Para determinar los sólidos en suspensión en la situación actual en distintos tramos del río se han utilizado las medidas realizadas en el CEDEX en 6 estaciones de aforos (Martín en Hajar (e14), Guadalope en Alcañiz (e15), Cinca en Fraga (e17), Segre en Serós (e25), Ebro en Sástago (e112) y Ebro en Flix (e121) que se distribuyen a lo largo de la cadena formada por los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix.

Las medidas del caudal líquido y la toma de muestras, en un número de 50, se realizaron, intermitentemente, a lo largo de un período que se encuentra comprendido entre 1975 y 1992, el cual puede considerarse representativo de la situación actual y por tanto refleja las relaciones actuales entre los caudales líquidos y sólidos en distintos tramos del río. Estas curvas no deben aplicarse en periodos anteriores a la construcción de los embalses pues no representarían las relaciones entonces existentes entre los caudales líquidos y sólidos.

En la figura adjunta se han representado los puntos muestreados y las ecuaciones de ajuste en las estaciones de aforo consideradas.

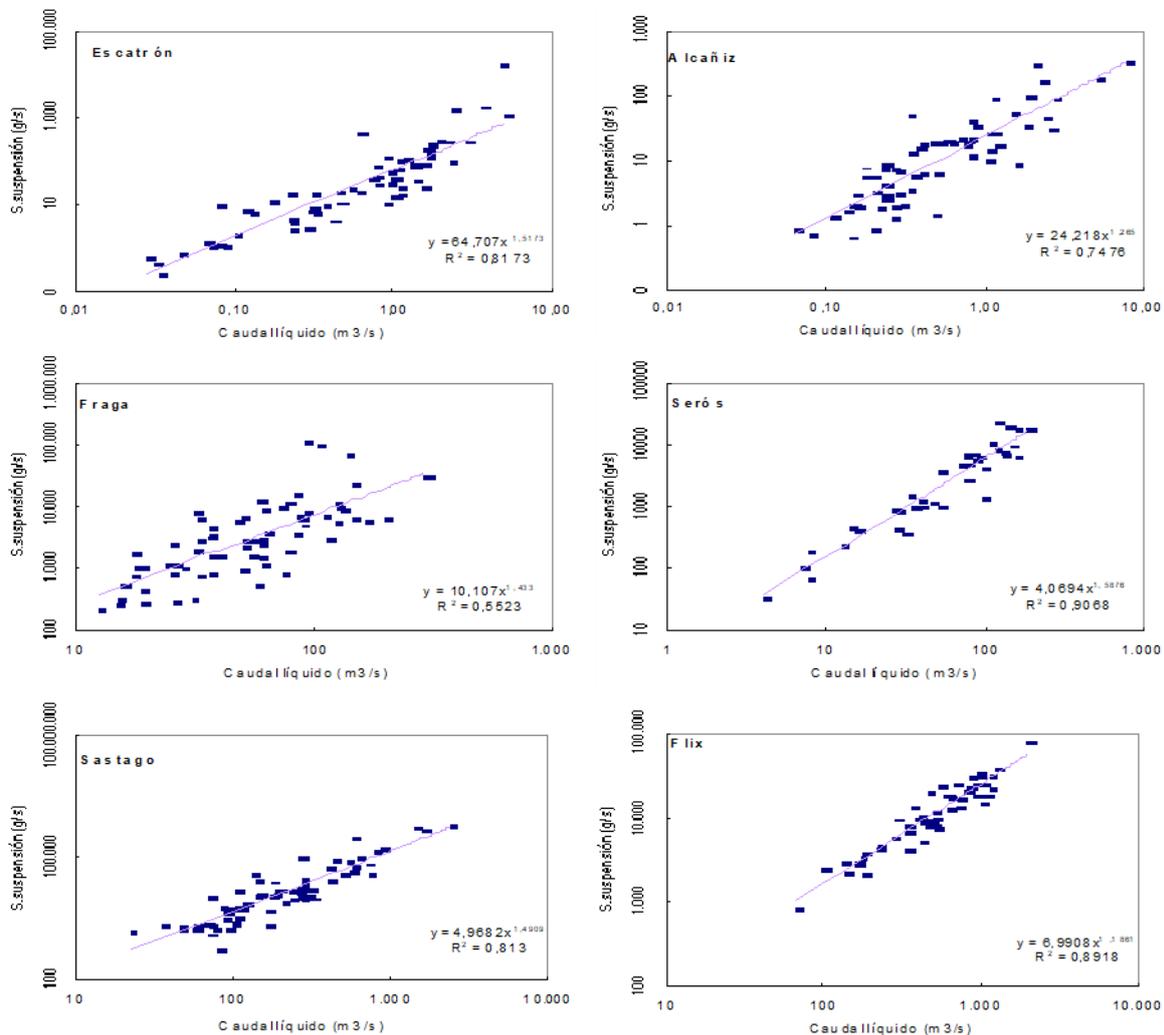


Figura A3. Curvas que relacionan el caudal líquido con la carga de sólidos en suspensión en distintos puntos de la cuenca del Ebro

La aplicación de las curvas de la figura A3 en el periodo 1975 a 1992 da lugar a series diarias de caudales sólidos, donde a pesar de los problemas antes mencionados destacan especialmente los eventos de crecida (figura A4).

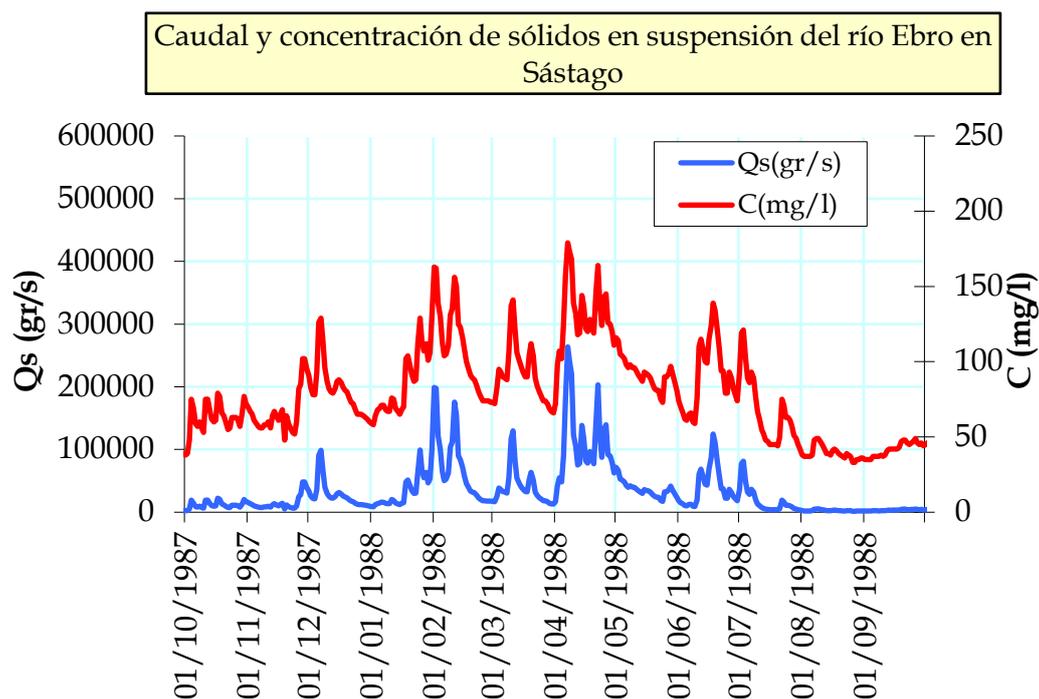


Figura A4. Estimación de los caudales (Q_s) y concentraciones (C) de sólidos en suspensión del río Ebro en Sástago en el año hidrológico 1987/88

Los resultados de sólidos en suspensión medios anuales se recogen en la tabla 8, donde se observa que, con carácter general y con la excepción del Ebro en Flix, los valores estimados por este procedimiento son muy inferiores a los obtenidos a partir de las batimetrías. Mientras que los sólidos en suspensión en el Ebro y en el Segre son por este procedimiento del orden de 0,8 y 0,4 millones de toneladas/año con el de las batimetrías eran de 6,8 y 1,15 millones de toneladas/año respectivamente, discrepancia que se explica por las razones antes señaladas. Es evidente por tanto que los aforos de sólidos en suspensión, en este caso, minorizan excesivamente el valor de los aportes y que sería conveniente mejorar los procedimientos de aforo de los caudales sólidos en situaciones de crecida.

Tabla A5. Sólidos en suspensión en régimen actual (periodo 1975 a 1992) en distintos puntos de la cuenca del Ebro

Estación	Código	Caudal medio anual (m^3/s)	Caudal sólido medio anual (g/s)	Concentración sólidos en suspensión (mg/l)	Aportación media ($hm^3/año$)	Aportación media sólidos en suspensión ($10^6 tn/año$)	Margen
Martín en Hajar	0914	0,6	32	53	19	0,001	der.
Guadalupe en Alcañiz	0915	3,6	158	44	114	0,005	der.
Cinca en Fraga	0917	74	5899	80	2333	0,19	izq.
Segre en Serós	0925	77	5164	67	2434	0,16	izq.
Ebro en Sástago	09112	229	24851	108	7235	0,78	izq.
Ebro en Flix	09121	375	8344	22	11.835	0,26	izq.



En cualquier caso, la información de la tabla 8 es útil para estudiar el comportamiento de los sólidos en suspensión en situaciones de aguas bajas y medias. Según esos datos, de los sólidos que llegan al complejo de embalses de Mequinenza y Ribarroja, el 70% procede del río Ebro y el 29% del Segre, mientras que de los cauces de la margen derecha recibe menos del 1%. Estas cifras relativas coinciden mejor que las totales con las estimaciones realizadas por batimetrías (84 % por el Ebro y 16 % por el Segre).

La mayor parte de los sólidos transportados en suspensión por los cauces considerados quedan retenidos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja (del orden del 77 %), ya que por la salida del complejo (sección de Flix) sólo pasa una media de 0,26 millones de toneladas anuales frente a una entrada de 1,13 millones de toneladas.



ANEJO 5: PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL BORDE LITORAL DEL DELTA DEL EBRO



PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

(Anejo 5. Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro)

1 INTRODUCCIÓN	7
1.1 Objetivo.....	7
1.2 Antecedentes históricos del Delta.....	8
1.2.1 Formación del Delta del Ebro.....	8
1.2.2 Primeras ocupaciones del Delta.....	10
1.2.3 Estudios sobre el Delta del Ebro hasta 1999.....	11
1.2.3.1 Trabajos del siglo XIX hasta 1970.....	11
1.2.3.2 Trabajos de 1970 a 1980.....	11
1.2.3.3 Trabajos desde 1980 hasta 1999.....	11
2 ESTUDIOS Y ACTUACIONES RECIENTES.....	19
2.1 Estudios recientes.....	20
2.1.1 “Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro” (LIM y U. de Barcelona, 1999-2000)	20
2.1.2 “Estrategia para la gestión sostenible de la costa. Demarcación hidrográfica del Ebro: Documento de diagnóstico preliminar (julio, 2007)” (Taller de Ingeniería Ambiental, S.L., 2007)	32
2.1.3 “Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña. Número 1: el Delta del Ebro. Documento de síntesis” (Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, 2008)	37
2.1.3.1 Vulnerabilidad del sistema físico.....	41
2.1.3.2 Vulnerabilidad de los sistemas naturales.....	42
2.1.3.3 Vulnerabilidad del sistema humano	50
2.1.3.4 Prognosis de la línea de costa exterior del Delta	50
2.1.4 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión de la desembocadura y cauce inferior del río en el delta del Ebro (Tarragona)” (Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria -IHAC- Universidad de Cantabria, julio de 2011)	59
2.1.5 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero del Delta del Ebro” (LIM, 2011).....	65
2.1.5.1 Evolución costera.....	66
2.1.5.2 Balance sedimentario.....	71
2.1.5.3 Evolución futura de la línea de costa del delta.....	75
2.1.5.4 Efecto de la subida del nivel del mar.....	78
2.1.5.5 Evolución del Fangar y los Alfaques	79
2.1.5.6 Zonas potencialmente inundables.....	85
2.1.5.7 Efecto de los temporales	87
2.1.5.8 Soluciones.....	89
2.1.6 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero, desembocadura y cauce inferior del delta del Ebro” (IHAC y LIM, 2012)	92
2.1.6.1 Estudio y análisis de actuación y gestión del frente costero del delta del Ebro.....	92
2.1.6.2 Estudio y análisis de actuación y gestión de la desembocadura y el cauce inferior del río Ebro.....	92
2.1.7 “Informe síntesis sobre la vulnerabilidad del delta del Ebro. Propuesta de medidas generales en el ámbito del Delta” (Berga y Berga, 2017).	92
2.1.7.1 Propuesta de actuaciones para la adaptación al Cambio Climático.....	93
2.1.7.2 Regresión, sedimentos y subsidencia	93
2.1.7.3 Impactos del cambio climático. Subida del nivel del mar.....	98
2.1.8 “Accions per al clima al Delta de l’Ebre (ACDE)-Diagnosi” [“ <i>Acciones por el clima del Delta del Ebro-Diagnóstico</i> ”]; Oficina Catalana del Canvi Climatic (2017).....	99
2.1.8.1 Contexto físico, natural y socioeconómico.....	99



2.1.8.2	Clima y cambio climático en el Delta del Ebro.....	102
2.1.8.3	Principales vulnerabilidades del Delta del Ebro.....	104
2.1.9	“La problemática del delta del Ebro frente a la regresión y a la inundación. Propuestas de actuaciones consensuadas desde el territorio” (2019).....	107
2.2	Actuaciones recientes	107
2.2.1	Adquisición de terrenos (2010)	108
2.2.2	Obras de emergencia para la reparación de daños producidos por los temporales enero y febrero 2015 en diversos cordones dunares y playas de la provincia de Tarragona (2015)	109
2.2.3	Obras de emergencia daños producidos en marzo 2015 (T.M. de Alcanar, Sant Jaume d’Enveja, Amposta y Deltebre). (2015)	110
2.2.4	Estabilización del sistema dunar de las playas de Riumar (Próxima ejecución, 2020)	111
2.2.5	Obras de emergencia con motivo de los temporales de enero de 2020.....	112
3	CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL AMBITO DEL DELTA DE EBRO.....	117
3.1	Introducción	117
3.2	Caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Mequinenza y Ribarroja y en el curso bajo del río Ebro.....	117
3.2.1	Evolución histórica del transporte del sedimento en el tramo bajo del río Ebro	118
3.2.2	Caracterización del sedimento del embalse de Mequinenza	119
3.2.3	Caracterización del sedimento del embalse de Ribarroja	125
3.2.4	Revisión de los datos de aforo sólido realizados por el CEDEX	126
3.2.5	Influencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja en la dinámica sedimentaria del curso bajo del río Ebro.....	127
3.2.6	Conclusiones sobre la retención de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja	130
4	DINÁMICA LITORAL	132
4.1	Sedimentos.....	132
4.1.1	Fuente de sedimento.....	132
4.1.1.1	Estudios anteriores de arenas aportadas por el río Ebro	133
	“Plan Indicativo de Usos del Dominio Público Litoral (provincia de Tarragona)” (PIDU) (MOPU, 1978).....	133
	“Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del delta del Ebro” (Guillén, 1992).....	136
	“Estudio de la dinámica litoral del delta del Ebro y prognosis de su evolución (dinámica litoral del delta del Ebro) - informe final” CEDEX (Peña, 1996)	138
	“El sistema sedimentario del Delta del Ebro” (Serra, 1997)	140
	“Informe síntesis sobre la vulnerabilidad del delta del Ebro. Propuesta de medidas generales en el ámbito del Delta” (Berga y Berga, 2017).	140
	Otros estudios	141
4.1.1.2	Evolución en el tiempo de los aportes del Río Ebro al mar	141
4.1.1.3	Aportes actuales del río Ebro al mar.....	142
4.1.1.4	Dirección de los aportes	143
4.1.2	Distribución de la arena en la plataforma deltaica	144
4.1.2.1	Guillén (1992)	144
4.1.2.2	Peña-CEDEX (1996)	146
4.1.2.3	Cartas Náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina-IHM (1974 y 2019).....	148
4.1.3	Sumideros de sedimento	150
4.1.4	Característica de los sedimentos a lo largo de la costa del Delta	156
4.1.4.1	“Estudio sobre la regeneración de la playa del Trabucador” (Grassa-CEDEX, 1988) ...	156
4.1.4.2	“Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del delta del Ebro” (Guillén, 1992).....	157
4.1.4.3	“Estudio de la dinámica litoral del delta del Ebro y prognosis de su evolución (dinámica litoral del delta del Ebro) - informe final” (Peña- CEDEX, 1996)	158
4.1.4.4	“Llibre verd de l'estat de les zones costaneres a Catalunya 2010- Tarragona” (CIIRC, 2010) [GENCAT, 2010].....	160



4.1.4.5 Resumen de las características de los sedimentos en las playas del Delta	163
4.2 Transporte sólido litoral	163
4.2.1 Tipos de cálculo de transporte longitudinal en todo el Delta	165
4.2.2 Trabajos que determinan el transporte longitudinal de sedimentos.....	166
4.2.2.1 “Estudio sobre la regeneración de la playa del Trabucador” (Grassa-CEDEX, 1988)	167
4.2.2.2 “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario” (Jiménez et al.-GENCAT, 1990)	168
4.2.2.3 “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario a partir de tendencias evolutivas de la línea de orilla” (Jiménez y García-GENCAT, 1991)	169
4.2.2.4 “Estudio de la regresión del Delta del Ebro y propuesta de alternativas de actuación” (IBERINSA, 1992)	170
4.2.2.5 “Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del Delta del Ebro” (Guillén, 1992)	171
4.2.2.6 “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario y esquemas de transporte” (Jiménez et al.-GENCAT, 1992).....	173
4.2.2.7 “Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain” (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993).....	174
4.2.2.8 “Estudio de la dinámica litoral del delta del Ebro y prognosis de su evolución (dinámica litoral del delta del Ebro) - informe final” (Peña-CEDEX, 1996).....	175
Evidencias morfológicas del transporte sólido litoral.....	175
Cálculo teórico.....	176
Cálculo teórico en arrastre y suspensión	177
Cálculo por evolución de la costa	177
Comparación de resultados con estudios anteriores	177
4.2.2.9 “Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro” (LIM-UB, 2000)	178
4.2.2.10 “Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña. Número 1: el Delta del Ebro. Documento de síntesis” (GENCAT, 2008)	179
4.2.2.11 “Llibre verd de l'Estat de la zona costanera a Catalunya. Tarragona” (CIIRC, 2010) ...	180
4.2.2.12 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión de la desembocadura y cauce inferior del río en el delta del Ebro (Tarragona)” (IHAC-UC, 2011).....	182
4.2.2.13 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero del Delta del Ebro” (LIM, 2011)	183
4.2.3 Resumen del transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa del Delta del Ebro	185
4.3 Balance sedimentario	187
4.3.1 Estudios con balance sedimentario.....	190
4.3.1.1 “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario a partir de tendencias evolutivas de la línea de orilla” (Jiménez y García-GENCAT, 1991)	190
4.3.1.2 “Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del Delta del Ebro” (Guillén, 1992)	191
4.3.1.3 “Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain” (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993)	191
4.3.1.4 “Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro” (LIM-UB, 2000)	192
4.3.1.5 “Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña. Número 1: el Delta del Ebro. Documento de síntesis” (GENCAT, 2008)....	193
4.3.1.6 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero del Delta del Ebro” (LIM, 2011)	193
4.3.2 Balance sedimentario global del sistema litoral del Delta	194
4.3.2.1 Balance sedimentario (1957-2018)	194
4.3.2.2 Balance sedimentario (1983-2018)	195
4.3.2.3 Balance sedimentario (1994-2018)	196
4.3.2.4 Balance sedimentario (2004-2018)	197
4.3.2.5 Balance sedimentario (2015-2018)	198
4.3.3 Resumen de los balances sedimentarios.....	200
4.3.4 Distorsiones en el balance sedimentario y en el transporte longitudinal de sedimentos	201



4.3.4.1 Capacidad de los sumideros (bahías del Fangar-Ampolla y los Alfaques).....	201
4.3.4.2 Análisis de presiones de la zona sur del Delta.....	202
4.3.4.3 Rotura de barras	203
4.3.4.4 Distribución de sedimentos	204
5 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	205
5.1 Base documental (Documentación básica).....	205
5.1.1 Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Oficina Española de Cambio Climático (2006)	206
5.1.2 Impactos en la Costa Española por efecto del Cambio Climático, Oficina Española de Cambio Climático y Universidad de Cantabria (IH Cantabria, 2004).....	207
5.1.3 Mapas de Peligrosidad y Riesgo requeridos por el Real Decreto 903/2010.....	209
5.1.4 Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española (D. Gral. de Sostenibilidad de la Costa y el Mar, 2016).....	209
5.1.5 Informe Especial del IPCC sobre Océanos y Criosfera (SROCC) (IPCC, 2019)	213
5.1.6 Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos del cambio climático a lo largo de la costa Española (IH Cantabria-MITERD, 2019) ..	215
5.2 Estudio específico sobre la costa del Delta del Ebro.....	218
5.2.1 Proyección de variables climáticas marinas en el Delta del Ebro.....	218
5.2.1.1 Variación del oleaje con el cambio climático	219
5.2.1.2 Variación del nivel del mar con el cambio climático.....	221
5.2.2 Estudios específicos sobre el efecto de la subida del nivel del mar en el perfil de playa	222
5.2.3 Estudios específicos sobre el efecto de la subida del nivel del mar en el riesgo de inundación	224
5.2.4 Estudios específicos sobre otros efectos asociados al cambio climático	225
5.3 Metodología para el análisis de los efectos del cambio climático	232
5.3.1 Fases del análisis.....	233
5.3.1.1 Factor climático.....	233
5.3.1.2 Impactos	234
5.3.1.3 Clasificación o tipo de costa.....	235
5.3.1.4 Efectos en la costa	236
5.3.2 Respuesta de la costa flexible a la subida del nivel del mar	236
5.3.2.1 La Regla de Bruun y su aplicación a playas barrera.....	237
5.3.2.2 Metodología aplicada al estudio de la erosión por la subida del nivel del mar en el Delta del Ebro	239
5.3.3 Efectos de la subida del nivel del mar sobre el Delta.....	243
5.3.3.1 Efectos en la playa urbana de El Arenal	243
Escenario de emisiones RCP4.5	243
Escenario de emisiones RCP8.5	244
5.3.3.2 Efectos en las playas tipo barrera	245
Playa Illa de Buda - Escenario de emisiones RCP4.5.....	245
Playa Illa de Buda - Escenario de emisiones RCP8.5.....	246
Playa del Trabucador - Escenario de emisiones RCP4.5	247
Playa del Trabucador - Escenario de emisiones RCP8.5	248
5.4 Alternativas de adaptación	249
6 TIPOS DE ACTUACIONES Y SUS CONDICIONANTES	251
6.1 Condicionantes de las alternativas de actuación.....	251
6.1.1 Consideraciones previas	251
6.1.2 Tipos de actuación por su extensión.....	252
6.2 Tipo de actuaciones y alternativas a considerar.....	253
6.2.1 Descripción general de las alternativas consideradas	253
6.2.2 Acomodación al cambio.....	255
6.2.2.1 Evolución natural, controlada.....	255
6.2.2.2 Restablecimiento de los aportes sedimentarios	256
Traslado del sedimento retenido en los embalses de la cuenca del Ebro	257
Reposición del déficit de sedimento de una fuente exterior al sistema	257
Recirculación de la arena del sistema.....	258



6.2.3 Protección de la costa	258
6.2.4 Retirada o abandono de la zona activa de costa	262
6.3 Análisis de los problemas costeros en el Delta	262
6.3.1 Análisis de los problemas globales	263
6.3.1.1 Falta de aportes de sedimentos.....	263
6.3.1.2 Descompensación sedimentaria	268
6.3.1.3 Falta de regulación y control de los sumideros y sus agentes	269
6.3.1.4 Inundación de la plataforma deltaica.....	270
6.3.2 Análisis de los problemas parciales	271
6.3.2.1 Ordenación de las playas y sus servicios	271
6.3.2.2 Ocupación urbana de la franja litoral más próxima al mar y humedales inundables	272
6.3.2.3 Ocupaciones agrarias	273
6.3.2.4 Ocupación de actividad salinera en la península de la Banya	274
6.3.2.5 Vertido de fangos orgánicos	275
6.3.2.6 Estado medioambiental de las lagunas.....	276
6.3.2.7 Degradación ecológica de las bahías y presión sobre ellas	278
6.4 Alternativas de actuación según el tipo de problema.....	278
6.4.1 Alternativas de actuaciones globales	278
6.4.1.1 Alternativas de actuación ante la falta de aportes sedimentarios del río Ebro	279
Acomodación	279
Protección.....	280
Retirada	281
6.4.1.2 Alternativa de actuación ante la descompensación sedimentaria en la distribución de los aportes del río Ebro.....	281
Acomodación	282
Protección.....	282
Retirada.....	282
6.4.1.3 Alternativa de actuación ante la falta de control y regulación de los sumideros y agentes actuantes en ellos	283
6.4.1.4 Alternativas de actuación contra la inundación de la plataforma deltaica	284
6.4.2 Alternativas de actuaciones parciales	284
6.4.2.1 Alternativas de actuación sobre problemas urbanos.....	285
Acomodación	286
Protección.....	287
Retirada	287
6.4.2.2 Alternativas de actuación sobre problemas de ocupaciones agrarias	287
6.4.2.3 Alternativas de actuación sobre el problema de ocupación de actividad salinera en la península de la Banya	287
Acomodación	287
Protección.....	287
Retirada	288
6.4.2.4 Alternativas de actuación sobre los problemas de calidad del medioambiente.....	288
7 ZONIFICACIÓN Y PROPUESTAS DE ACTUACIONES	289
7.1 Zonificación de la costa del Delta del Ebro	289
7.1.1 Sistema litoral del delta del Ebro.....	289
7.1.2 Partes de la costa del Delta del Ebro	293
7.1.2.1 Descripción del Hemidelta norte	293
7.1.2.2 Descripción de la desembocadura	294
7.1.2.3 Descripción del hemidelta sur.....	295
7.2 Propuesta de actuaciones	296
7.2.1 Objetivo de las actuaciones	296
7.2.2 Necesidades	297
7.2.3 Formas de trabajo que pueden incluir las propuestas	298
7.2.4 Condicionantes de la arena a mover.....	298
7.2.5 Obras auxiliares	299
7.2.6 Actuaciones complementarias	299
7.2.7 Resumen de las actuaciones y alternativas propuestas	300
7.3 Cálculo preliminar de las actuaciones y las variables que lo condicionan	301



7.3.1 Variables para la configuración de un perfil natural de acomodación del Delta del Ebro	301
7.3.2 Ecuaciones que rigen la variación de la línea de orilla	302
7.3.2.1 Retroceso de la línea de orilla debido a los temporales.....	304
7.3.2.2 Retroceso debido a la subida del nivel del mar	304
7.3.2.3 Retroceso debido a la marea meteorológica.....	305
7.3.2.4 Retroceso debido a la subsidencia.....	306
7.3.2.5 Retrocesos debido a la erosión de la costa	307
7.3.2.6 Retroceso debido a la incertidumbre	308
7.3.2.7 Retroceso total	308
7.3.2.8 Análisis de las variables de altura mínima de berma.....	309
Elevación por oleaje (setup)	310
Elevación por marea meteorológica.....	310
Elevación por cambio del nivel del mar debido al cambio climático	310
Elevación por subsidencia.....	310
Elevación por tasa erosiva	310
Elevación mínima de berma	311
7.3.3 Propuesta de actuaciones	311
7.3.3.1 Creación de una banda de protección costera libre.....	311
Sumidero Norte (S_{norte}): Playa del Arenal y puerto de Illa del Mar.....	313
Z ₁ : Fangar	314
Z ₂ : Extremo este de la península del Fangar y playa de la Marquesa.....	316
Z ₃ : Playa de Riumar y Garxal	317
Z ₄ : Illa de San Antoni (A) e Illa de Buda (B).....	318
Z ₅ : Eucaliptus	319
Z ₆ : Trabucador.....	322
Z ₇ : Península de la Banyà	322
Sumidero Sur (S_{sur}): Bahía de los Alfaques.....	322
7.3.3.2 Trasvases de arena de las zonas de depósito a las zonas erosivas	323
Obras auxiliares.....	325
7.4 Desarrollo temporal de las actuaciones	326
8 RESUMEN, CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE ACTUACIONES	327
8.1 Resumen y conclusiones.....	327
8.2 Propuesta de actuaciones	330

ANEJO 1: Referencias bibliográficas



1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVO

El presente documento se redacta a solicitud de la Dirección General de la Costa y del Mar (DGCM) del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD), dentro del marco de cooperación entre la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) plasmado en la Encomienda de Servicio Técnico para la realización de asistencia técnica, investigación y desarrollo tecnológico (2017-2020), a través de su Centro de Estudios de Puertos y Costas.

El objetivo principal del mismo es proponer un Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro (Tarragona), que aborde su defensa ambiental y los retos que presenta el cambio climático, en particular la subida del nivel del mar. Con este Plan se pretende fomentar y facilitar su uso público, así como mantener los valores naturales del Delta. Como su propio nombre indica, el “Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro” se concentra en la franja litoral, dentro del ámbito competencial de la DGCM, y las mejoras que se ha considerado necesario introducir en la misma, teniendo en cuenta todos los condicionantes físicos, humanos y medioambientales que puedan afectar en mayor o menor medida al devenir de dicha franja litoral y sus mejoras de las condiciones de uso.

Para ello, en primer lugar el presente documento analiza una buena parte de los trabajos efectuados recientemente sobre la dinámica litoral y riesgos del cambio climático en el Delta del Ebro, así como diversos datos relacionados con la zona, complementando y actualizando aquellos cuando se ha considerado necesario. Es importante recalcar el número tan grande de estudios y datos analizados, por lo que solamente se complementarán éstos cuando sea necesario o cuando las diversas fuentes utilizadas se contradigan. Este análisis es fundamental para definir la estrategia general a adoptar y se presenta en el **Capítulo 2**.

Tras esta recopilación, en el **Capítulo 3** se resumen los trabajos sobre caracterización del régimen sedimentario en el ámbito del Delta de Ebro. Estos trabajos, realizados por el Centro de Estudios Hidrográficos, incluyen un análisis de retenciones de sedimento en los dos grandes embalses de Mequinenza y Ribarroja. Los datos de este trabajo se utilizan y sus fuentes se citan muy especialmente en los Capítulos 4 y 6 al tratar de las fuentes de sedimento y tipos de actuaciones.

A partir de esta recopilación y análisis de estudios previos, el Plan continúa analizando específicamente dos cuestiones fundamentales en el comportamiento pasado, presente y futuro del Delta, y que son:

- **Capítulo 4:** Dinámica litoral del Delta, con un profundo análisis que se ha llevado a cabo de las fuentes sedimentarias, transporte de sedimentos y balance sedimentario del Delta del Ebro
- **Capítulo 5:** Efectos del cambio climático, que recoge los principales resultados de diversos estudios específicos sobre la costa del Delta, incluyendo también un análisis complementario de los efectos del cambio climático en las playas urbanas y playas tipo barrera.



Una vez descritos los valores medioambientales del Delta, así como los principales procesos costeros y climáticos que influyen en su evolución, o pueden afectarlo a lo largo de este siglo, el Plan finaliza con dos apartados más extensos dedicados al análisis de las alternativas para proteger al Delta frente a sus diversos problemas y la propuesta preliminar de un plan de actuaciones de protección. Estos dos apartados son:

- **Capítulo 6:** Tipos de actuaciones y sus condicionantes.
- **Capítulo 7:** Zonificación y propuestas de actuaciones. En este capítulo se presentan y desarrollan pormenorizadamente los cálculos justificativos del conjunto de actuaciones propuestas.

1.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL DELTA

1.2.1 Formación del Delta del Ebro

Un delta es una acumulación de sedimento que rebasa la orilla primitiva de la desembocadura de un río debido a que la acción directa del oleaje no ha sido capaz de distribuir el sedimento que aporta el cauce mediante el transporte sólido litoral a lo largo de la costa a un lado y otro de la salida del río. Por tanto, el delta no deja de ser un depósito “temporal” de sedimento cuyo destino más probable es ser redistribuido por el mar a lo largo de la costa adyacente.

Sin embargo, cuando la acumulación de sedimento crece y se mantiene en el tiempo, es frecuente que se utilice para fines y usos humanos, habitualmente agrícolas. Es decir, la citada temporalidad no siempre se percibe por el ser humano y con el tiempo el delta se convierte, de cara a su visión y los usos que le da al delta, como un elemento estático y rígido que tiende a preservar sin considerar los procesos naturales que lo conformaron y que lo condicionan. No obstante, esto le confiere al delta un valor social y económico evidente que se ha enraizado con el tiempo.

El Delta del Ebro es sin duda una de las morfologías costeras más estudiadas de nuestras costas. De todos los estudios realizados sobre el mismo, los siguientes apartados resumen algunos de los más destacados realizados hasta comienzos de este siglo. Los estudios y actuaciones más recientes se describen con mayor detalle en el segundo capítulo.

El Delta del Ebro no es una excepción. Según el PIDU (1978) tiene una edad de unos 12.000 años; pero que no afloró hasta finales del imperio romano; existiendo en este periodo en forma de sedimentos no consolidados. Hasta el siglo XVI la parte existente de él estaba formada por marjales defendidos por flechas litorales que se desarrollaban entre ellas y la tierra firme –de ese periodo es el primer mapa conocido debido al cartógrafo turco Piri Reis de 1513 (Figura 1.1)- no estando ocupados los arenales que entonces existían. En su libro, el cartógrafo turco describe la desembocadura:

“... la desembocadura de este río está encerrada por una capa baja y arenosa con forma de lengua y es por esta capa que los barcos que se encuentran en la desembocadura del río no temen a los ocho vientos...”

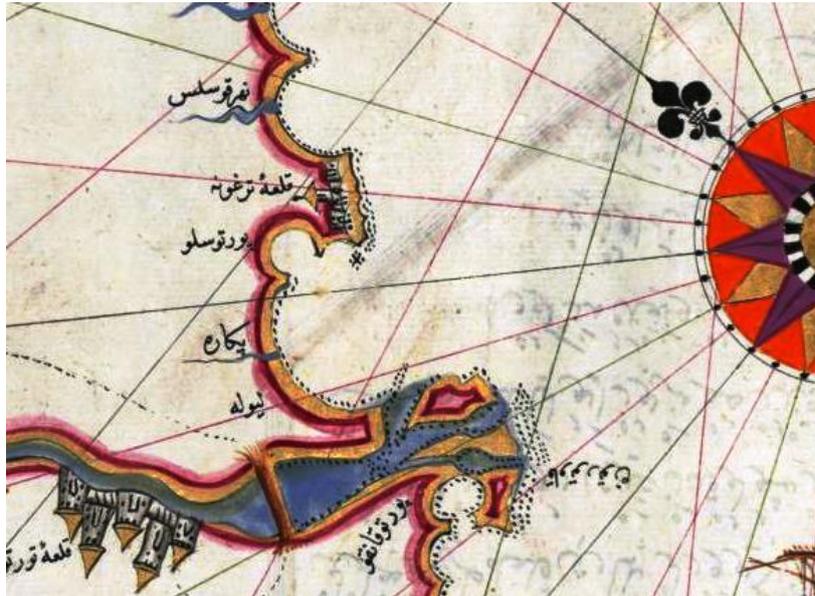


Figura 1.1: Delta del Ebro en 1513 según el cartógrafo turco Piri reis (Fuente: Walters Art Museum)

A partir de ese siglo comienza la colonización de su parte sur; pero no es hasta el siglo XVIII cuando comienzan las primeras transformaciones y ocupaciones de la planicie deltaica; con la construcción del canal de navegación, con la política de Floridablanca, en el reinado de Carlos III que finalizó en 1794; pero que ya aparece en la primera carta náutica española, conocido como atlas de Tofiño, de 1789 (Figura 1.2). Esta carta náutica contiene los primeros sondeos del fondo de la costa del Delta y en ella se delinea el contorno del delta sumergido, estando ya muy conformada la llanura deltaica actual.

El citado mapa, sin embargo, no representa ninguna ocupación ni usos agrícolas



Figura 1.2: Carta náutica de Tofiño de 1789 en la que aparece el Delta y está delimitado el contorno del delta sumergido (Fuente: Biblioteca Nacional)



1.2.2 Primeras ocupaciones del Delta

Fue algo después, a mediados del siglo XIX, cuando se rotura la planicie del delta con el fin de explotarla agrícolamente, fundándose la Compañía de Canalización y Riegos del Delta del Ebro en 1861 (Figura 1.3). A partir de entonces, la llanura deltaica del Delta del Ebro se ha ido colonizando, y esa antropización ha hecho de esta formación un elemento fijo en el territorio, cuando, en realidad estaba evolucionando al compás que las transformaciones humanas de territorio le permitían.



Figura 1.3: Mapa del Delta del Ebro de 1860 donde ya se aprecia la colonización de la planicie deltaica (Fuente: Comunitat de Regants del Canal de la Dreta (Berga et al., 2017))

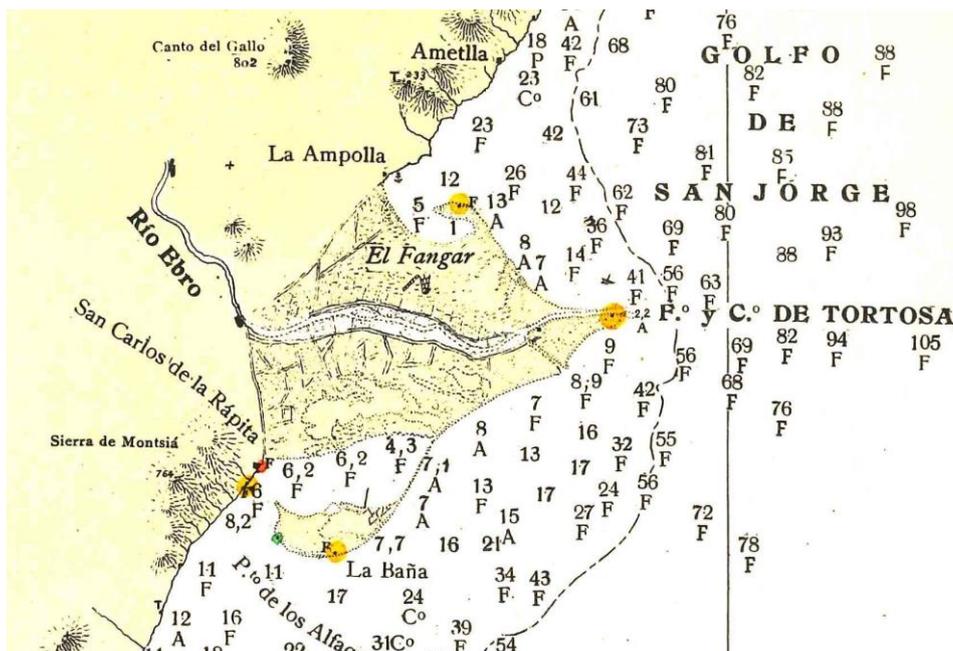


Figura 1.4: Delta del Ebro en la carta náutica 160-A de 1945



1.2.3 Estudios sobre el Delta del Ebro hasta 1999

1.2.3.1 Trabajos del siglo XIX hasta 1970

Pronto, el Delta fue el punto de mira de algunos estudios, pero los primeros que aparecieron como el de Hermenegildo Gorría (1880) lo hacían con la idea del análisis de su explotación más que con el conocimiento de su evolución, y no pensando en su preservación (solo dos de los trabajos revisados se corresponden de manera aproximada con el objeto de este Plan).

Ya en el siglo XX, Francesch Carreras y Candi, geógrafo, en su “Geografía General de Cataluña” (1911) y en “La navegación en el río Ebro” (1940) analiza diversos aspectos relacionados con el Delta y los aportes sólidos del río. En la misma vía es el libro de Enrique Bayerri “Historia de Tortosa y su comarca II”. También lo hizo el geógrafo francés Pierre Deffontaines (1949), pero siempre con la misma idea de estudio ya que aún no había aparecido indicios de problemas relacionados con su estructura morfológica. El número de trabajos que se han usado de este periodo, es bastante escaso; solamente seis hasta 1970.

1.2.3.2 Trabajos de 1970 a 1980

Hay que esperar a los años 70 del pasado siglo para que aparezcan los primeros trabajos sobre el Delta desde el punto de vista medioambiental en el que se traslucen los problemas de cambio de rumbo que en su evolución se apreciaba. Es muy relevante la tesis doctoral de Andrés Maldonado, “El Delta del Ebro: Estudio sedimentológico y estratigráfico”, de 1972, que sería el comienzo de un sinnúmero de trabajos, tesis, artículos, etc. Dentro del conjunto de ellos es de resaltar el trabajo que sobre el Delta contiene el PIDU de la provincia de Tarragona de 1978. Aun así, en el periodo comprendido entre 1970 y 1980, los trabajos centrados en el objeto del Plan era solamente de siete, de los cuales cuatro corresponden a Maldonado y su equipo.

1.2.3.3 Trabajos desde 1980 hasta 1999

Es a partir de la década de los 80 del pasado siglo cuando empiezan a fluir trabajos, especialmente a partir de la segunda mitad, correspondiendo con los primeros problemas que empiezan a aparecer en la barra del Trabucador. La Dirección General de Puertos y Costas se plantea entonces su regeneración (CEDEX, 1988) y la Generalitat de Catalunya impulsa un plan de estudio del Delta: “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el Delta del Ebro” que generó un total de 42 informes entre los años 1988 y 1994.

Un punto de inflexión se produjo con el temporal del 10 de octubre de 1990, cuando el oleaje rompió la barra del Trabucador dejando una abertura de 800 m y un calado máximo de 0,5 m (Jiménez et al., 1991). El temporal duró desde el día 8 hasta el 11, aunque las alturas de ola no fueron excesivamente grandes, como muestra el gráfico de la serie temporal de altura de ola significativa (Figura 1.6), del punto SIMAR 2095128 frente al Delta (Figura 1.5); alcanzando un pico de 2,69 m a la una de la tarde del día 10 de octubre. Su combinación con una marea meteorológica media de 0,4 m (Figura 1.7) y la propia debilidad de la Barra, hizo que el mar penetrase en la bahía de Los Alfaques.



CEDEX



Figura 1.5: Situación del punto SIMAR 2095128 frente al Delta del Ebro (Fuente: Puertos del Estado)



Figura 1.6: Serie temporal de la altura de ola significativa del punto SIMAR 2095128 frente al Delta del Ebro en octubre de 1990 (Fuente: Puertos del Estado)

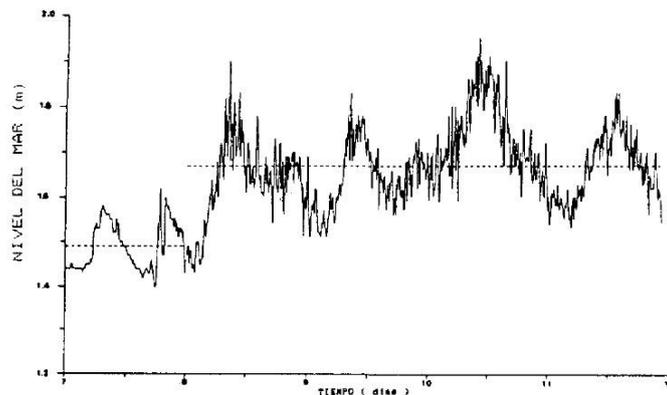


Figura 6. Registros de nivel del mar en L'Atmella desde 7/10/90-11/10/90.

Figura 1.7: Marea (meteorológica y astronómica) en el Delta del Ebro durante el temporal de octubre de 1990 (Fuente: Jiménez et al., 1991)

Las fotografías que entonces se tomaron (Montoya y Galofré, 1997) muestran la acción del mar sobre la Barra (Figuras 1.8 y 1.9). También se aprecia esta magnitud en los dibujos que presentan el trabajo de Sánchez-Arcilla et al. (1997), donde muestran la situación de la Barra en el mes de julio de ese año y tras el temporal citado (Figura 1.10). La cantidad de arena movilizada, perdida de la barra emergida, en esta zona fue de 70.000 m³ que se redistribuyó y depositó, tanto en la cara interna de la barra, bahía de los Alfaques, como en la externa, formando una gran plataforma sumergida (Jiménez et al., 1991). Pero, la marea meteorológica de 40 cm tiene un periodo de retorno muy pequeño, en torno a 1,4 años (Figura 1.11) y la altura de ola no fue de gran magnitud, lo que indica la facilidad con la que puede romperse la barra, que no obstante tiene también capacidad para recuperarse con facilidad.



Figura 1.8: Rotura de la Barra del Trabucador en octubre de 1990 (Foto: Montoya y Galofré, 1997)



CEDEX



Figura 1.9: Rotura de la Barra del Trabucador en octubre de 1990 (Foto: Montoya y Galofré, 1997)

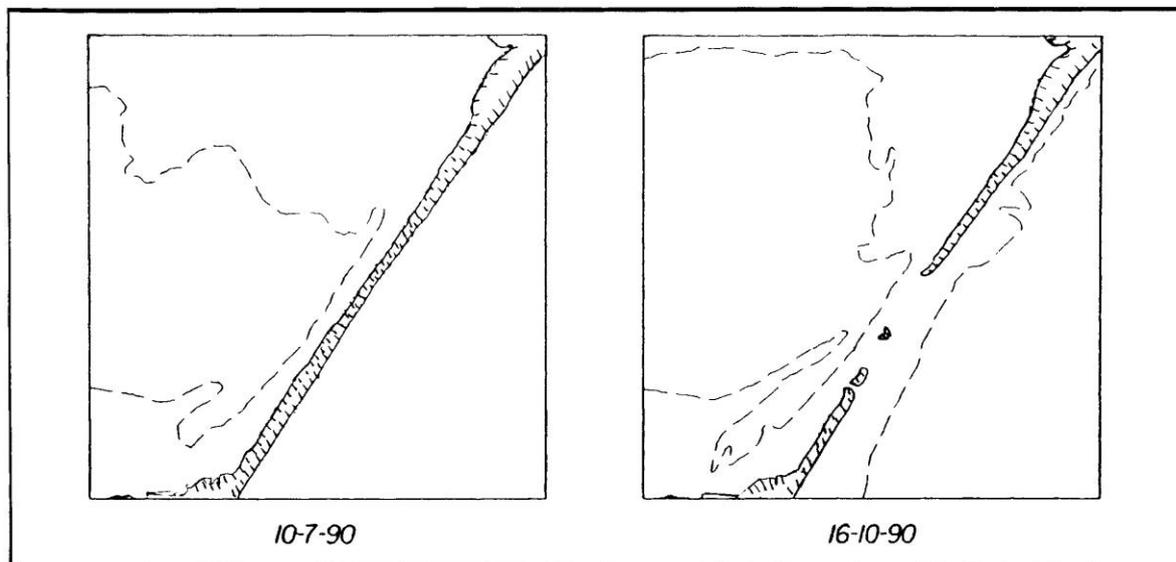


Figura 1.10: Situación de la Barra del Trabucador en julio y octubre de 1990 (Foto: Sánchez-Arcilla et al., 1997)

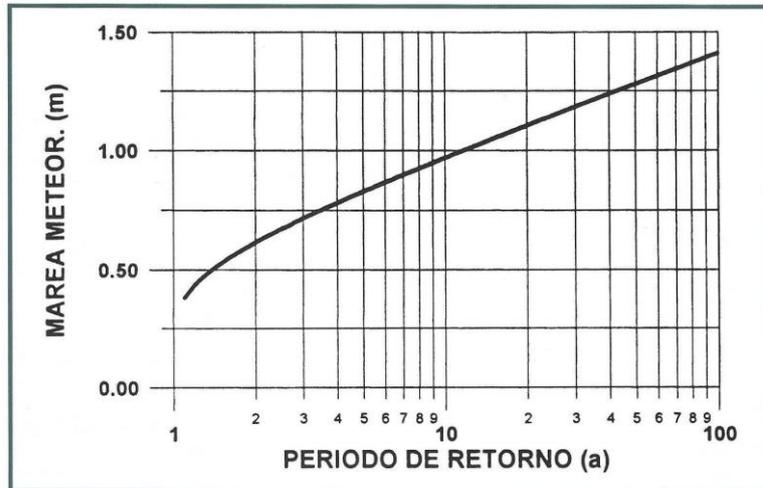


Figura 1.11: Distribución extremal de marea meteorológica (Foto: Sánchez-Arcilla et al., 1997)

En la década de 1990-2000, se realizaron, aparte del Plan de la Generalitat citado anteriormente, al menos 26 trabajos relacionados con el Delta; gran parte de ellos están derivados de los trabajos para la Generalitat de Catalunya (GENCAT), y otros fueron encargos de la Dirección General de Costas al CEDEX que consistieron en un informe recopilatorio de los trabajos realizados hasta entonces sobre el Delta (CEDEX, 1995) y otro informe sobre su dinámica litoral (CEDEX, 1996). De esta misma época, y dentro de este grupo de estudios y publicaciones, se destaca la Revista de Obras Públicas monográfica del Delta del Ebro (Figura 12) en la que publicaron todo el abanico de especialistas que entonces trabajaban en el tema.

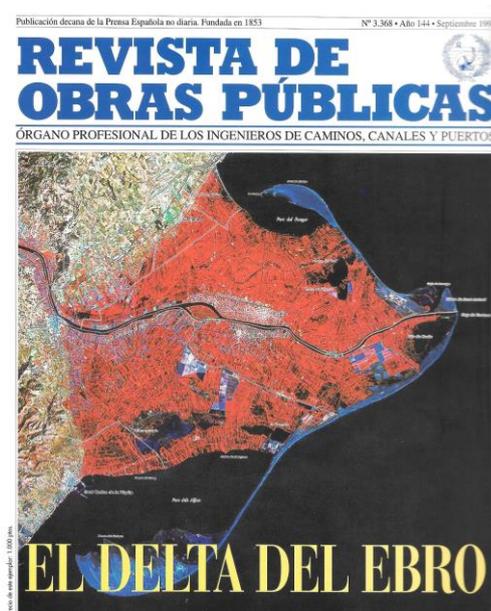
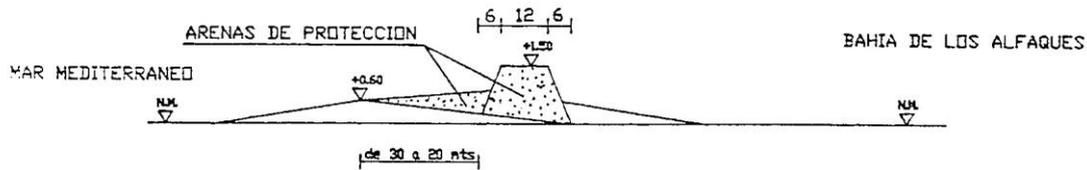


Figura 1.12: Monográfico de la Revista de Obras Públicas de septiembre de 1997

En enero de 1991, la entonces Dirección General de Costas, realiza una obra de emergencia en la Barra del Trabucador mediante la construcción de 1 km de duna que tenía una altura de 1,5 m y 12 m de anchura en coronación y 24 m en la base, finalmente se hizo una plantación y empalizadas para fijar la duna (Figuras 1.13, 14 y 15) (Montoya y Galofré, 1997).



Escalas
en metros

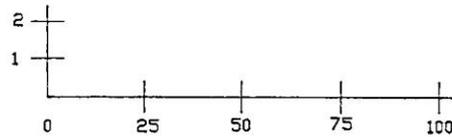


Figura 1.13: Perfil del proyecto de duna para regenerar la Barra del Trabucador en 1991 (Fuente: Montoya y Galofré, 1997)



Figura 1.14: Vertido de arena para la regeneración de la Barra del Trabucador en 1991 (Fuente: Montoya y Galofré, 1997)



Figura 1.15 Aspecto de la duna de la Barra del Trabucador en 1991 tras la ejecución de las obras
 (Fuente: Montoya y Galofré, 1997)

Las obras finalizaron en 1992 y en 1993, a solicitud del ayuntamiento de Sant Carles de la Rápita, se realizó el acceso a la Barra en 1994 (Figura 1.16) y en ese mismo año se empezó ejecutar un camino y área de servicio junto al Río Migjorn (Figura 1.17). Finalmente, en la figura 1,18 se presenta el plano de las obras ejecutadas y previstas de entonces (Figura 1.19).

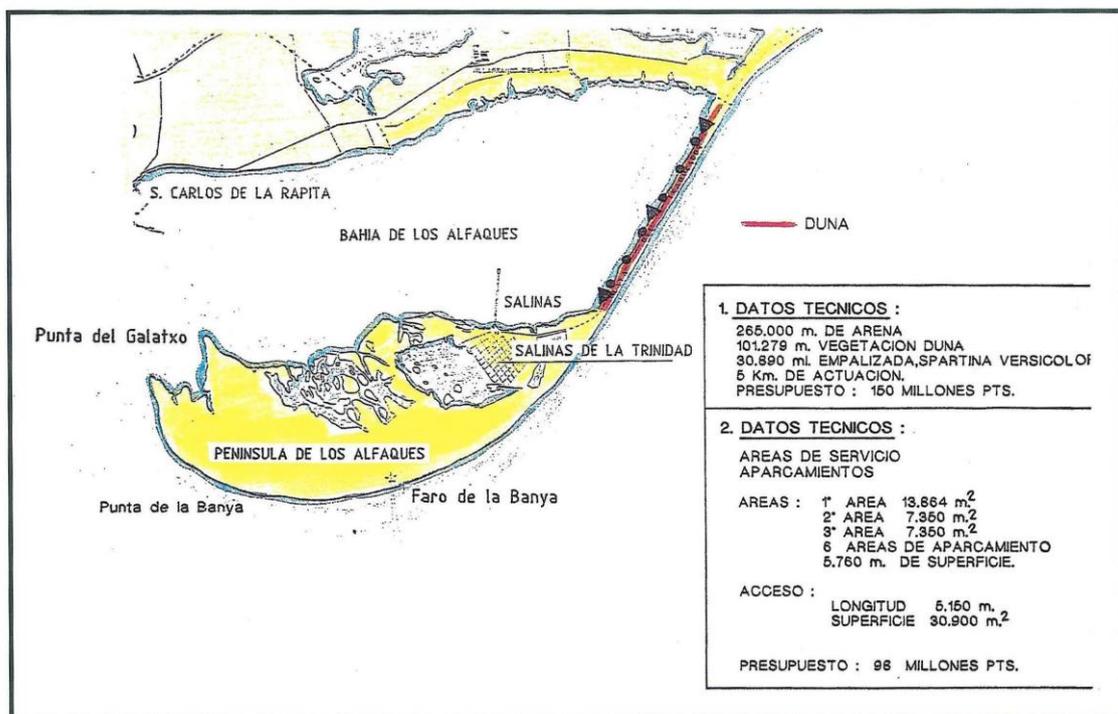


Figura 1.16 Obras de la Barra del Trabucador en 1991-92 (Fuente: Montoya y Galofré, 1997)



CEDEX

PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

Anejo 5. Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro

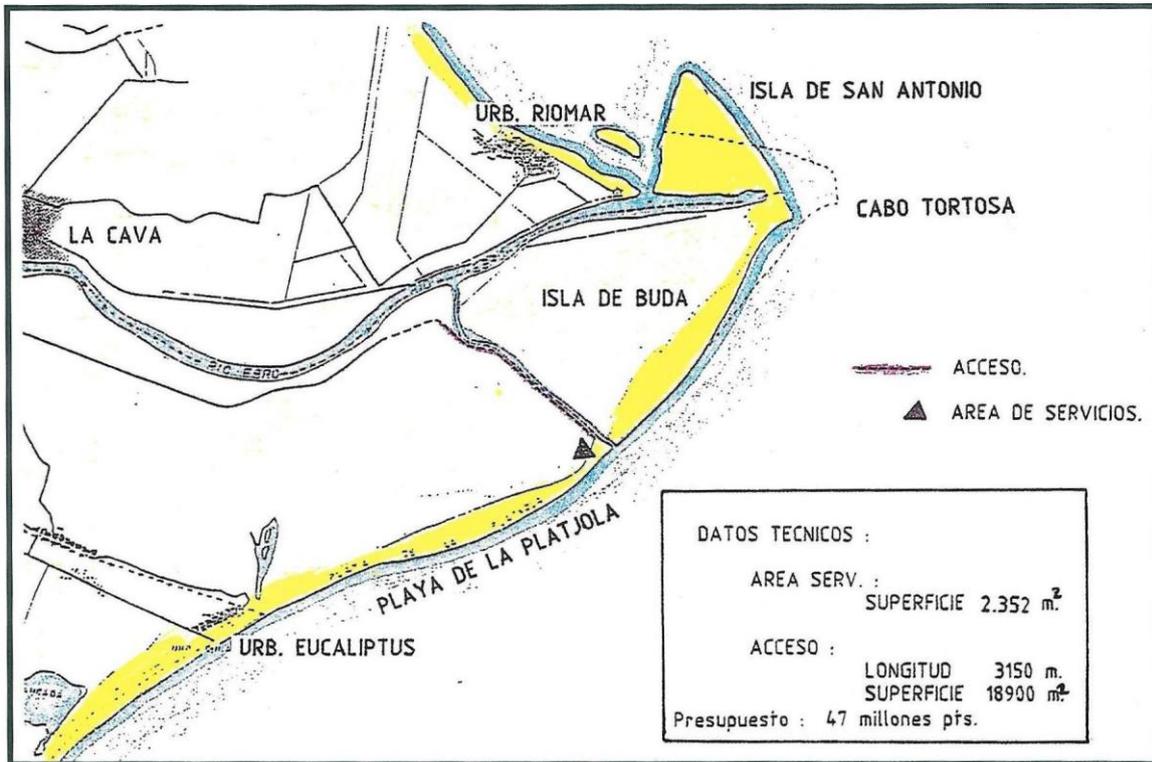


Figura 1.17 Obras en Sant Jaume D'enveja en 1994 (Fuente: Montoya y Galofré, 1997)

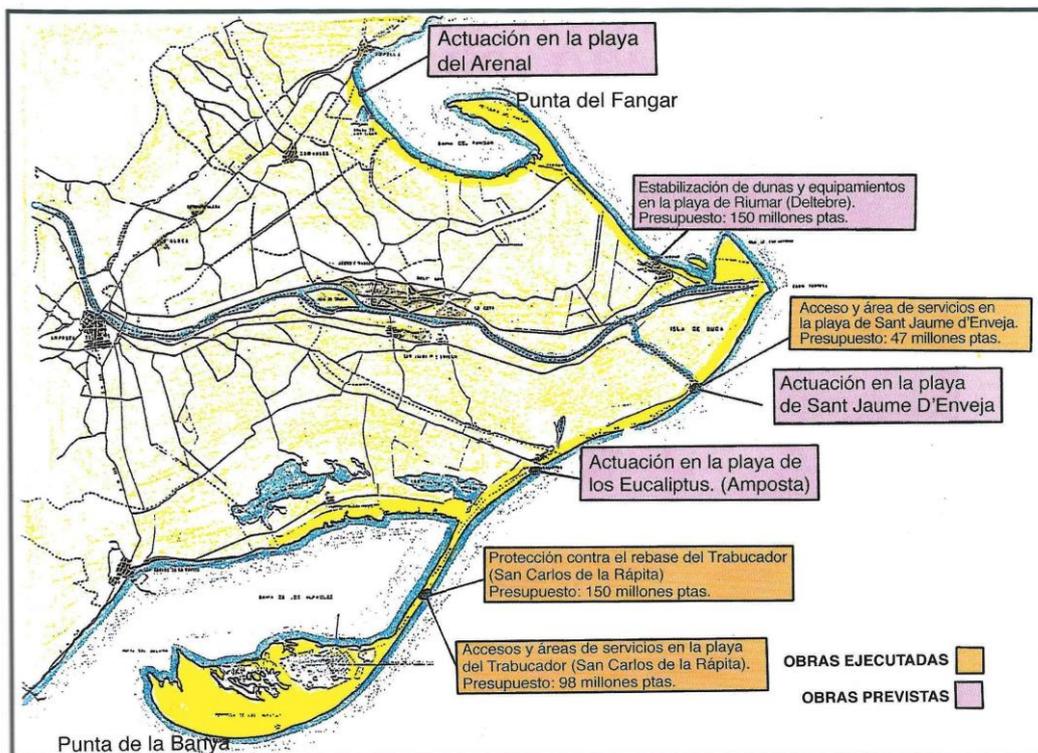


Figura 1.18: Obras ejecutadas y previstas en el Delta del Ebro en 1997 por la Dirección General de Costas (Fuente: Montoya y Galofré, 1997)

2 ESTUDIOS Y ACTUACIONES RECIENTES

El número de estudios, informes, artículos, libros, etc. que se han realizado sobre el Delta del Ebro y su costa es importantísimo; como ejemplo, el informe del CEDEX de 1996 (Peña, 1996) presenta una tabla en la que se clasificó el número de publicaciones sobre el tema realizadas hasta ese momento (Tabla 2.1). Por su interés ha parecido conveniente reproducirlo para hacerse una idea del volumen tan importante de documentación manejado, al que hay que sumar los estudios realizados desde esa fecha, que se han analizado con mayor profundidad y que se resumen en este capítulo, dado que son los que presentan los datos más actuales sobre el Delta. Se acompaña un apartado final en el que se resumen las actuaciones recientes más relevantes.

Tabla 2.1: Publicaciones sobre el Delta del Ebro aparecidas hasta 1996

Cuadro 1. Número de publicaciones en función del tipo de las mismas.									
Tipo de publicación	Localización geográfica		Objetivo de los trabajos				Idioma		
	Total	Parcial	Costas		Fluvial	Otros	Español	Inglés	Otros
			Global	Parcial					
Revista	26	3	0	26	1	3	11	17	1
Libro	7	0	1	4	1	1	6	1	0
Congreso	26	6	0	24	2	6	5	25	3
Tesis	8	0	0	6	0	2	7	0	1
Informe	64	5	3	45	15	6	66	2	0
Total	131	14	4	105	19	17	95	45	5

Cuadro 2. Número de publicaciones por la fecha de edición.									
Fecha de edición	Localización geográfica		Objetivo de los trabajos				Idioma		
	Total	Parcial	Costas		Fluvial	Otros	Español	Inglés	Otros
			Global	Parcial					
Hasta 1980	10	1	2	6	0	3	7	2	2
1981 a 1985	12	0	0	9	0	3	11	1	0
1986 a 1988	22	3	2	17	4	2	20	3	2
1989 a 1991	36	4	0	26	13	1	28	11	1
1992 a 1993	33	3	0	34	1	1	25	11	0
1994 a 1995	18	3	0	13	1	7	4	17	0
Total	131	14	4	105	19	17	95	45	5



CEDEX

2.1 ESTUDIOS RECIENTES

Dentro del conjunto de estudios, informes y trabajos realizados recientemente sobre la costa del Delta del Ebro, destacan cronológicamente los siguientes:

2.1.1 **“Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro” (LIM y U. de Barcelona, 1999-2000)**

En los años 1999 y 2000, el Laboratori d'Engnyeria Marítima (LIM) de la Universidad Politècnica de Catalunya y la Universidad de Barcelona realizan un informe para la Dirección General de Costas, titulado: “Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro”. Formalmente está dividido en tres volúmenes:

VOLUMEN I: Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del delta del Ebro. Diagnóstico (1999).

VOLUMEN II: Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del delta del Ebro. Priorización a corto plazo y soluciones (2000).

VOLUMEN III: Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del delta del Ebro. Restauración integral de la playa del Trabucador.

Su capítulo 1, “Introducción”, comienza con unas frases que son perfectamente actuales:

“Durante las últimas décadas la percepción sobre el Delta del Ebro (figura 1.1) ha estado dominada por una sensación de peligro inminente en cuanto a la integridad de esta parte del territorio... Esta percepción se ha intensificado especialmente durante la última década, pudiendo constatarse en el interés creciente de los medios de comunicación por el Delta del Ebro... estando en la mayor parte de las veces “conducida” por la presentación de un determinado evento meteorológico (e.g. acción de una tormenta sobre el delta con la consiguiente respuesta erosiva de la costa), por la afectación puntual de alguna actividad económica del delta (e.g. inundación temporal por parte del agua de mar de algún campo de cultivo)... Este interés creciente también se observa en la comunidad científico/técnica, habiéndose desarrollado numerosos estudios en y sobre el Delta del Ebro desde numerosos puntos de vista: geología, dinámica sedimentaria, ecología, socio-economía, efecto del cambio climático, etc... la frecuencia de estos estudios así como la de publicaciones científicas sobre el delta ha aumentado drásticamente durante las últimas décadas a medida que el número de proyectos científicos financiados con un objetivo centrado en el Delta del Ebro aumentaba...”

Este estudio aborda, profunda y escuetamente, los problemas del Delta asociado a los procesos de éste, enumerándolos en tres aspectos:

- que afecta a los intereses socio-económicos,
- que afecta a los valores naturales,
- que afecta su sostenibilidad (inicialmente geomorfológica).

Evalúa dentro del capítulo 2, “La dinámica deltaica”, la escala temporal que la divide: A Largo Plazo, a Medio Plazo, y Episódica.

Aquellas que llaman a largo plazo son las que se producen en periodos largos, décadas, y como ejemplo ilustrativo presentan gráficamente la evolución de la superficie emergida del Delta a lo largo del tiempo (Figura 2.1).

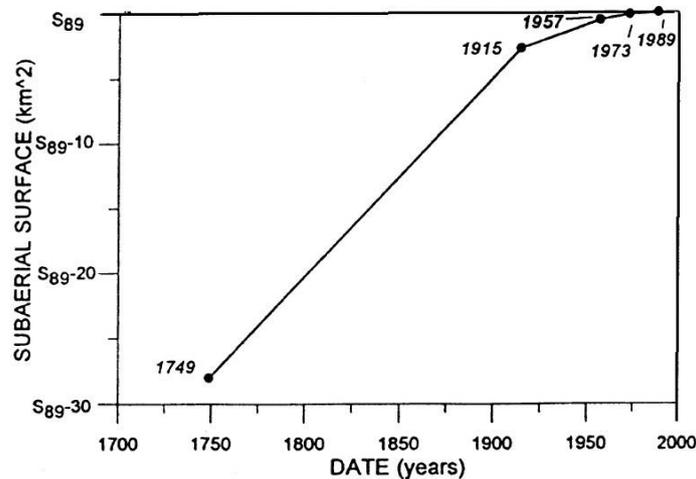


Figura 2.1: Estimación de los cambios de la superficie deltaica durante los últimos siglos (Jiménez, 1996) (Fuente: LIM y U. Barcelona, 2000).

La llamada a medio plazo engloba aquellos cambios producidos en años, y como ejemplo ponen las modificaciones de la costa que se ha producido en la última década (1990-2000) y lo representan por el balance sedimentario y transporte de sedimentos calculado a lo largo de las costas del Delta del Ebro (Figura 2.2).

La escala temporal que llaman “episódica” engloba aquellos eventos, temporales especialmente, que han afectado al devenir del Delta, tal es el caso de la rotura de la Barra del Trabucador producida en octubre de 1990, e indica: “...producida por la acción simultánea de una tormenta de oleaje con periodo de retorno de diez años y una marea meteorológica de periodo de retorno de 1,2 años (Sánchez-Arcilla y Jiménez, 1994)...”

Y, continúan analizando el último de los escenarios: El cambio climático (Figura 2.3). E indica:

“...En esta figura [Figura 2.3] se muestra la disminución del periodo de retorno de una inundación dada, asociado a la marea meteorológica existente en el Delta del Ebro, con y sin ascenso relativo del nivel medio del mar. Como puede observarse, el periodo de retorno en una situación dada, que inicialmente fuera de 50 años para el delta del Ebro, descendería a 13 años con un ascenso del nivel medio del mar de 0,25 m que correspondería a una subida eustática de 25 cm (estimación media del IPCC para el año 2050) prescindiendo de los efectos de la subsidencia local. Para un ascenso relativo del nivel medio del mar de 0,46 metros, incorporando en este caso una estima de la subsidencia local, el periodo de retorno para dicho nivel de inundación pasaría de 50 a 5 años...” (Figura 2.4)

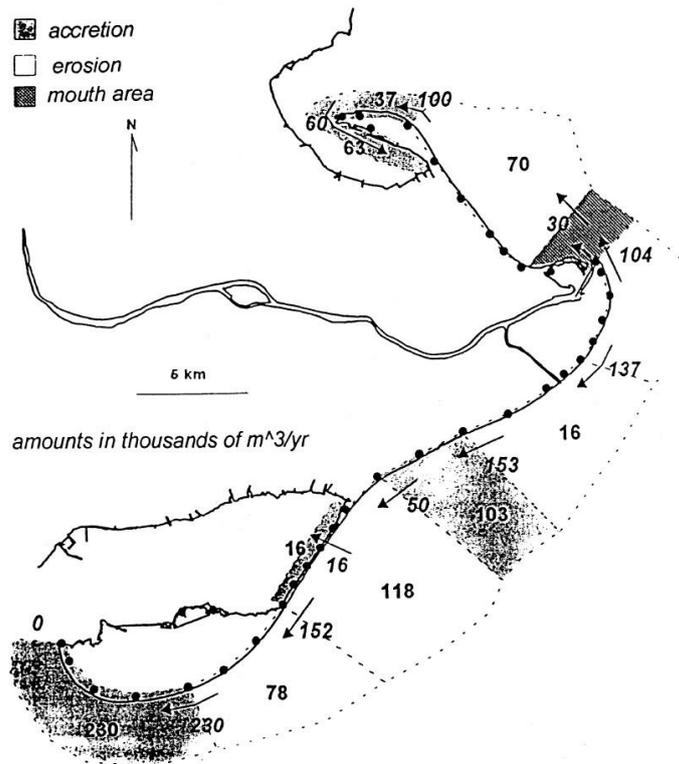


Figura 2.2: Cambios de volumen y transporte longitudinal de sedimento a lo largo de la costa del Delta del Ebro a una escala anual (modificado de Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993) (Fuente: LIM y U. Barcelona, 2000)

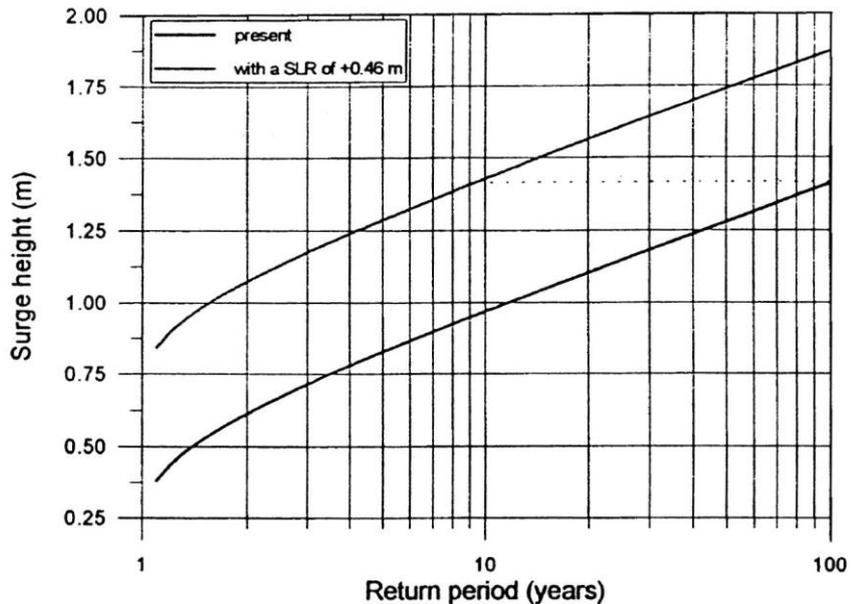


Figura 2.3: Clima de marea meteorológica en el Delta del Ebro con y sin subida del nivel del mar (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1997) (Fuente: LIM y U. Barcelona, 2000)

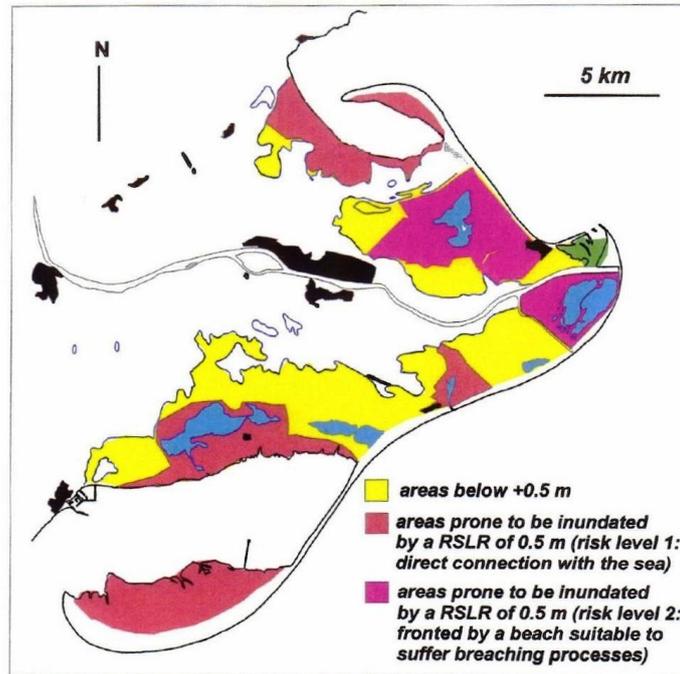
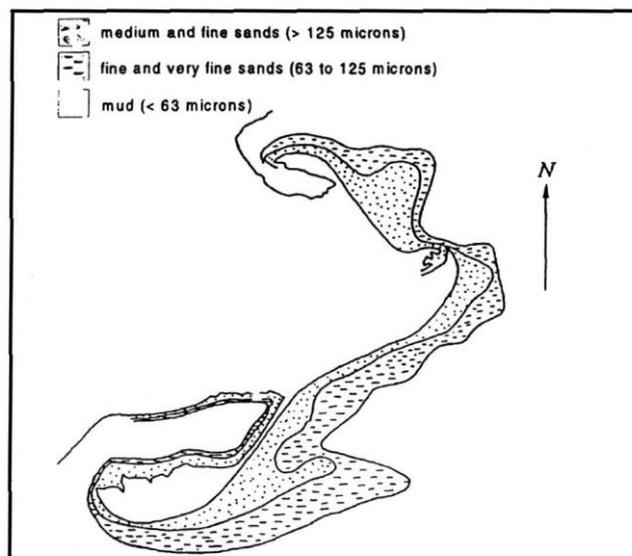


Figura 2.4: Áreas de riesgo para una subida relativa del nivel del mar (considerando ascenso eustático y subsidencia) de 055 m en el Delta del Ebro (Sánchez-Arcilla et al., 1996, 1998) (Fuente: LIM y U. Barcelona, 2000)

El análisis del balance sedimentario y efectos del cambio climático lo finaliza este estudio realizando un modelo matemático de una línea de evolución de la playa suponiendo que se produzcan cambios en el clima de oleaje, y utiliza información de campañas científicas y anteriores estudios realizados tanto en el Instituto de Ciencias del Mar (CSIC) como en el LIM para una zonificación sedimentaria del Delta (Figura 2.5).



(Guillén, 1992)

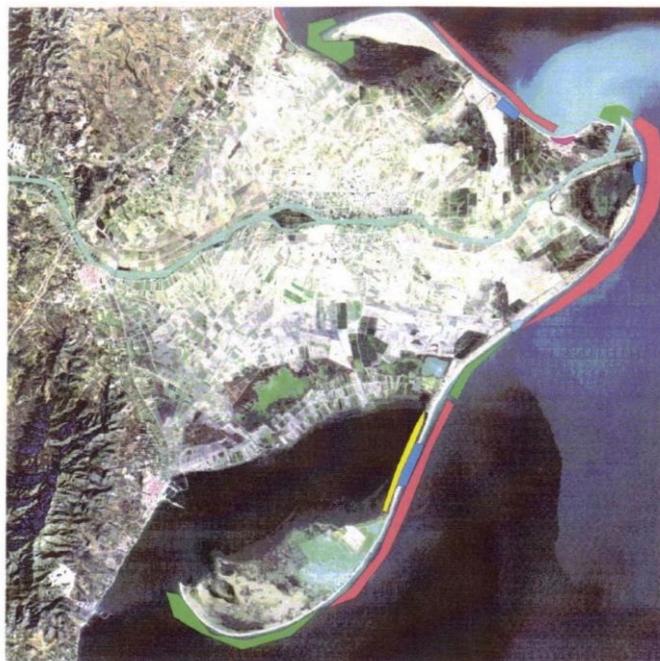
Figura 2.5: Caracterización de los sedimentos de la plataforma costera del Delta del Ebro según Guillén (1992) (Fuente: LIM y U. Barcelona, 2000)

En el capítulo 3 trata de los “Procesos actuantes y Zonificación de la costa del delta”, y lo divide en

1. Procesos relacionados con la dinámica litoral longitudinal
2. Procesos relacionados con el impacto de tormentas
3. Procesos relacionados con costas-barrera
4. Procesos relacionados con la estabilidad de campos de dunas
5. Procesos relacionados con la calidad del agua
6. Ocupación del territorio
7. Obras y actuaciones humanas a lo largo del delta
8. Procesos relacionados con la subida relativa del nivel del mar
9. Interacción entre procesos
10. Valoración de los problemas asociados a los procesos

En una de las figuras zonifica el Delta en función de los procesos dominantes (Figura 2.6), reflejando con claridad las zonas que se comportan como erosivas, aquellas que tienen una tendencia a aumentar, y las que son más vulnerables a los efectos de los temporales. De cada una de ellas se analiza: el proceso, los agentes implicados, la escala de tiempo, el efecto principal que se da y las consecuencias potenciales que produce.

En el último de los apartados, realizan una valoración de los problemas asociados a los procesos erosivos, de avance, a las barreras, campo de dunas, calidad de las aguas, ocupación del territorio, obras y actuaciones, y con la subida del nivel del mar



	zonas tipo 3.1.1 (ver texto)	[EROSIÓN]
	zonas tipo 3.1.2 (ver texto)	[AVANCE]
	zonas tipo 3.2 (ver texto)	[IMPACTO DE TEMPORALES]
	zonas tipo 3.3 (ver texto)	[COSTAS-BARRERA]
	zonas tipo 3.4 (ver texto)	[ESTABILIDAD DE CAMPOS DE DUNAS]
	zonas tipo 3.5 (ver texto)	[CALIDAD DEL AGUA]

Figura 2.6: Zonificación de las costas del Delta del Ebro según los procesos que dominan (Fuente: LIM y U. Barcelona, 2000)

El siguiente capítulo 4, "Caracterización de la Problemática en el delta del Ebro", va analizando los problemas más acuciantes de cada uno de los tramos de la costa del Delta.

Problemática en el Hemidelta Norte

1- Zona de la Bahía del Fangar (Figura 2.7):

- Retroceso de la Playa del Arenal.
- Ocupación de la franja costera entre El Goleró y la flecha del Fangar con cultivos canalizaciones y caminos-dique.
- Vertido de fangos orgánicos y problemas de anoxia.

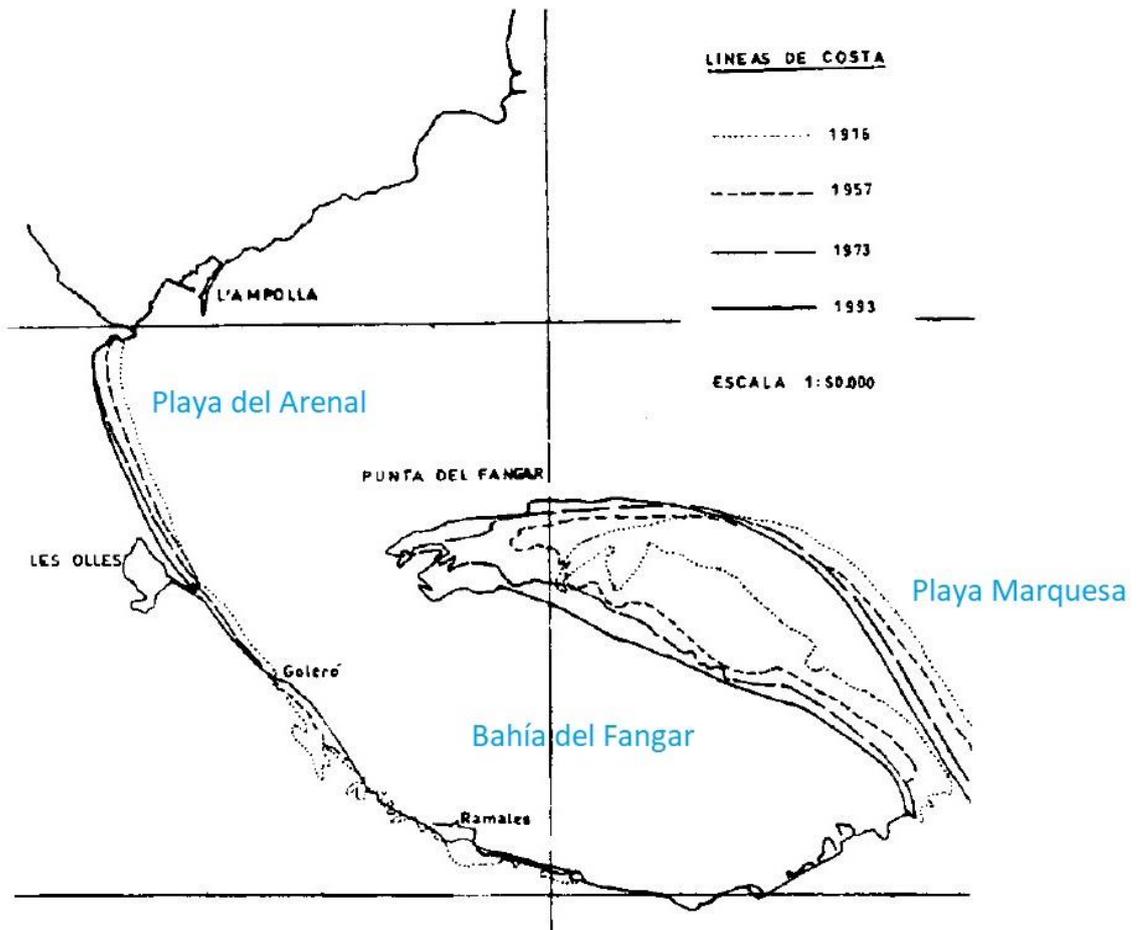


Figura 4.1. Evolución costera de la Bahía del Fangar (1916/1993).

Figura 2.7: Evolución del Fangar desde 1916 a 1993 (Fuente: LIM y U. Barcelona, 2000)

2- Zona de La Marquesa (Figura 2.8)

- Regresión de la línea de costa. Construcción de barreras a lo largo de la playa e inundaciones de campos adyacentes a la playa en temporales.
- Ocupación urbanística de zonas húmedas inundables.



CEDEX

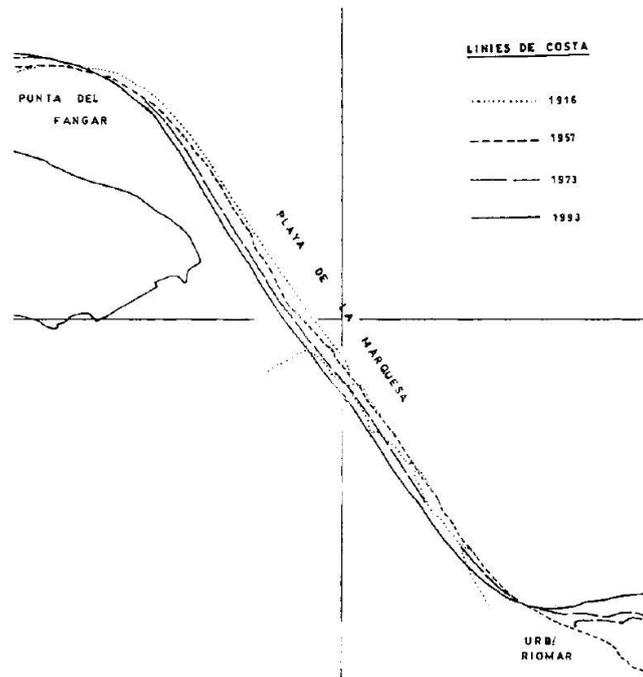


Figura 4.5. Retroceso de La Marquesa desde 1916 a 1993.

Figura 2.8: Evolución de Playa Marquesa desde 1916 a 1993 (Fuente: LIM y U. Barcelona, 2000)

3- Zona de la Punta del Fangar (Figura 2.7)

- Crecimiento de la Punta del Fangar, posible cierre de la bahía y aterramiento de la playa del Arenal y del puerto pesquero de La Ampolla.

4- Zona de la Illa de Sant Antoni

Hemidelta Sur

1- Zona de Buda - El Serrallo

- Tramo costero en retroceso.

2- Zona de la Platjola-La Tancada

- Estado de degradación en que se encuentra la laguna de la Platjola.

3- Zona del Trabucador - Faro de la Banyà

- La problemática ambiental viene determinada tanto por el turismo como por la actividad salinera.

4- Zona de la Punta Corballera

- No presenta ninguna problemática ambiental importante, ya que se trata de una zona en acreción totalmente natural, donde no se desarrolla ninguna actividad humana permanente.



5- Zona de la costa interna de la Banya

- Sin ninguna problemática ambiental importante.

6- Zona de la costa NW de la Bahía de los Alfacs

- La problemática ambiental deriva de la ausencia de una franja de vegetación natural entre los cultivos y la bahía.

En el Volumen 2 (2000) se ocupa más profundamente de los problemas de las zonas en que dividieron el Delta, enumeradas anteriormente: en total 8 zonas más las márgenes fluviales, y de cada una de ellas se entran a analizar de los problemas y las alternativas de actuación que se tiene:

1- Zona bahía del Fangar

- a. Degradación ecológica y afectación de los recursos vivos explotables en la bahía debido a un aporte excesivo de nutrientes y renovación insuficiente del agua.
 - i. Para implementar esta solución habría que convertir en marjales una determinada superficie de arrozales y/o zonas someras del borde de la bahía, separándolas del mar mediante una línea de playa artificial.
- b. Degradación ecológica y afectación de los recursos vivos explotables en la bahía debido a la colmatación con arenas y fangos orgánicos.
 - i. Como solución temporal, se podría considerar la opción de dragar el entorno de las bateas con lo que se conseguiría por un lado aumentar el calado local y, por otro, obtener material para regenerar la línea de costa interna de la Bahía.
- c. Desaparición de la franja costera interna debido a la ocupación del borde Sur de la Bahía con un camino-dique de escollera, malecones de tierra y cultivos.
 - i. Mantener una línea de diques de defensa frente a las inundaciones.
 - ii. Recrear enfrente de los diques de defensa una franja de costa de aspecto natural con arena del propio Delta.

2- Zona playa de la Marquesa

- a. Pérdida de zonas húmedas costeras de valor natural debido a su ocupación y construcción de obras.
 - i. la solución aparentemente más lógica del problema debería ser preservar por la vía legal los espacios húmedos legalmente protegido.
 - ii. Una forma eficiente de detener la degradación del entorno y recuperar la zona es la compra - expropiación de los terrenos y su posterior restauración por parte de la administración pública.



- b. Riesgos de inundación de campos de cultivo debido a la acción de tormentas y construcción irregular de diques costeros.
 - i. Solución adaptativa: no se aprecia ningún valor de alto interés que justifique la no adaptación de la demarcación del D.P.M.T. a la evolución natural de la costa. La compra o expropiación de una franja de 300 m de anchura requería adicionalmente una serie de medidas complementarias para la recuperación de la franja litoral y la protección de las propiedades agrícolas lindantes.
 - ii. Solución defensiva de la línea de costa actual: dos opciones básicas: 1) Resolver los efectos (suministrar arena al sistema para compensar el déficit de sedimentario actual), o 2) Resolver las causas (reducir los gradientes en el transporte longitudinal).

3- Zona Illa de Sant Antoni

- a. Pérdida de calado en la desembocadura del río debido al depósito de sedimento
 - i. La solución más razonable sería la de regular la navegación fluvial prescindiendo de la desembocadura como vía fluvio-marina ordinaria, y en todo caso rehabilitar un canal de navegación entre el Ebro y cualquiera de las dos bahías del delta.

4- Zona el Garxal

- a. Pérdida de zonas húmedas costeras de valor natural debido a su ocupación y construcción de obras
 - i. La solución aparentemente más lógica del problema debería ser preservar por la vía legal los espacios húmedos legalmente protegidos, evitando la ocupación de dichas zonas.

5- Zona Buda-el Serrallo

- a. Pérdida del ancho de playa e inundación de la laguna de la Alfacada con agua de mar durante temporales.
 - i. La actuación más recomendable, la remodelación de los diques actuales suavizando su perfil para favorecer un pasaje más natural, y permitir la reintegración de la zona en la dinámica natural del tramo. Asimismo, se propone mejorar la canalización de la acequia de drenaje que une la laguna al brazo de Migjorn.

6- Zona la Platjola-la Tancada

- a. Pérdida de zonas húmedas costeras de valor natural debido a su ocupación y construcción de obras.



- i. Dado que además son zonas susceptibles de formar parte del dominio público marítimo terrestre cabe tomar en consideración la opción de valorar su interés natural y evitar su degradación e incorporarlas al DPMT y proceder a su posterior restauración.
- b. Ocupación no regulada por parte de vehículos y usuarios de la parte posterior de la Playa de los Eucaliptos.
 - i. La solución óptima: limitar las vías de acceso a unas pistas previamente seleccionadas, adecuar espacios delimitados para aparcamiento de vehículos, y desde ellos, pasarelas para acceder a la playa funcional sin deteriorar las áreas sensibles de las zonas posteriores a la playa.
- c. Riesgo de inundaciones ocasionales de zonas cultivadas próximas a la laguna de la Tancada durante la acción de temporales.
 - i. El riesgo de inundación debido a la sobreelevación del nivel de la laguna por rebase del oleaje sobre la playa puede ser minimizado mediante la construcción/adecuación de una acequia paralela a la costa que recorra el límite entre la playa y la marisma posterior, desembocando directamente en la bahía.

7- Zona barra del Trabucador-Faro de la Banya

- a. Disminución progresiva del ancho del Trabucador e incremento del riesgo de roturas, erosión del camino y áreas de servicio al turismo e interrupción temporal del acceso rodado a la Banya.
 - i. Restauración de las condiciones naturales: Eliminación de los obstáculos significativos para el rebase de la Barra por parte del oleaje durante la acción de temporales y permitir así el aporte de sedimento a la cara interna.
 - ii. Reperfilamiento de la parte emergida de la Barra restaurando su perfil topográfico original, que actualmente se halla notablemente alterado en diversos tramos por la permanencia de restos de la duna artificial.
 - iii. Replanteamiento de servicios: 1) Sustitución del camino existente por uno compatible con la naturaleza del lugar; 2) Replanteamiento y restauración del conjunto de las infraestructuras y servicios (tendido eléctrico, ordenación de usos salineros, marisqueros, turísticos, etc.)
- b. Pérdida del ancho de playa y del camino público de acceso a la Banya y afectación de los diques de las salinas.
 - i. La actuación más recomendable sería pues continuar con el sistema tradicional de retranquear los diques hasta una distancia de la línea de orilla lo suficientemente amplia como para que el oleaje durante tormentas no incidiera directamente sobre ellos.



CEDEX

8- Zona bahía de los Alfacs

- a. Degradación ecológica y afectación de los recursos vivos explotables en la bahía debido a un aporte excesivo de nutrientes y renovación insuficiente del agua.
 - i. Se propone como solución al igual que ocurría en la Bahía del Fangar la creación de filtros biológicos por los que hacer pasar las aguas de los retornos de riego antes de ser expulsadas a la bahía mediante la construcción de marjales costeros a lo largo de la costa interna de la Bahía.
- b. Inundación de tierras agrícolas de cota intermareal.
 - i. Convendría hacer una revisión/inventario de obras existentes en la bahía y las lagunas, atendiendo por un lado al sistema de compuertas de las desembocaduras de las acequias de drenaje y por otro lado al sistema de diques de defensa más o menos blandos (guardas) al objeto de normalizar su morfología y optimizar su función.

9- Márgenes fluviales.

- a. Erosión de los márgenes, pérdida del bosque de ribera y vertidos ilegales de escombros.
 - i. Debería acometerse el reperfilamiento y la regeneración de los tramos de márgenes degradadas.
 - ii. Hay que garantizar, de forma práctica, una franja de dominio público lo suficientemente ancha para permitir la consolidación del bosque de ribera y un camino de ronda que permita el acceso y facilite el control y vigilancia del dominio público.

El volumen III del trabajo se destina íntegramente a la “Restauración integral de la playa del Trabucador”. Después de analizar las alternativas expuestas anteriormente; en el capítulo 4 describe la solución propuesta; dando las siguientes alternativas de actuación:

Reperfilamiento topográfico

- 1- Alternativa 0: Mantenimiento de la situación actual.
- 2- **Alternativa A: Desmantelamiento parcial de la duna.**
- 3- Alternativa B: Desmantelamiento total de la duna.

Camino

- 1- Alternativa 0: Mantenimiento de la situación actual.
- 2- **Alternativa A: Sustitución por un camino con base semirrígida soterrada.**
- 3- Alternativa B: Sustitución por una pista de arena.

Desmantelamiento del tendido eléctrico

- 1- Alternativa 0: Mantenimiento de la situación actual.
- 2- Alternativa A: Eliminación del tendido eléctrico v ninguna obra adicional.
- 3- Alternativa B: Eliminación del tendido eléctrico actual y sustitución por una línea soterrada a lo largo del Trabucador.
- 4- **Alternativa C: Eliminación del tendido eléctrico actual y sustitución por una línea submarina a través de la Bahía de los Alfaques (Figura 2.9).**

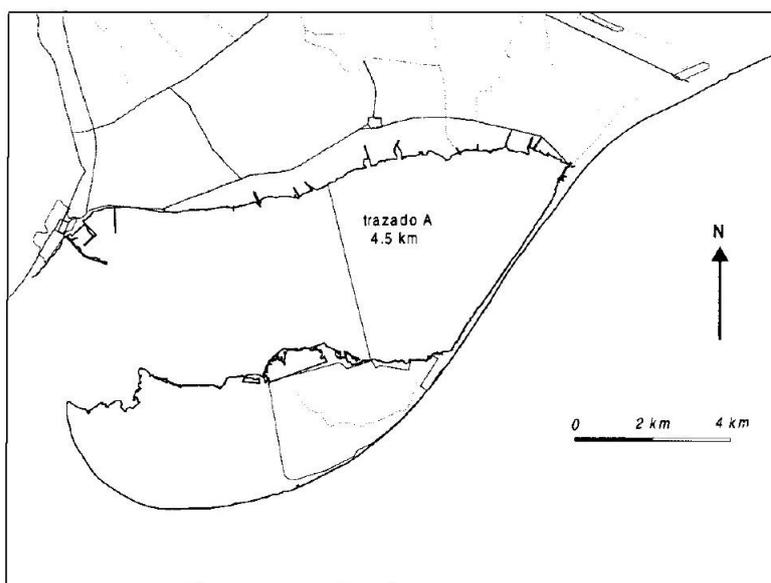


Figura 4.3. Zona aproximada para el tendido eléctrico submarino hasta la Banyà.

Figura 2.9: Trazado del tendido eléctrico submarino de la alternativa C (Fuente: LIM y U. Barcelona, 2000)

Áreas de servicio

- 1- Alternativa 0: Mantenimiento de la situación actual.
- 2- Alternativa A: Desmantelamiento de las áreas de servicio.
- 3- **Alternativa B: Área de servicio al norte del Trabucador.**
- 4- Alternativa C: Área de servicio y pantalán al norte del Trabucador

A continuación, tras un análisis de ellas, en el capítulo 5 eligen la solución más apta de cada una de las alternativas, que son las que se han puesto en negrita anteriormente.

En el capítulo 6 se analizan los “Planes de Usos” en sus cuatro vertientes:

- 1) Uso "natural".

- 2) Uso "industrial": Indirecto, de las Salinas de la Trinitat.
- 3) Uso "turístico".
- 4) Uso "pesquero".

Para cada uno de ellos se da una serie de recomendaciones de usos tendentes a racionalizarlos y que sean compatibles con la sostenibilidad del sistema.

2.1.2 “Estrategia para la gestión sostenible de la costa. Demarcación hidrográfica del Ebro: Documento de diagnóstico preliminar (julio, 2007)” (Taller de Ingeniería Ambiental, S.L., 2007)

Divide el Delta y entorno en tres Unidades de Gestión (Figura 2.10)

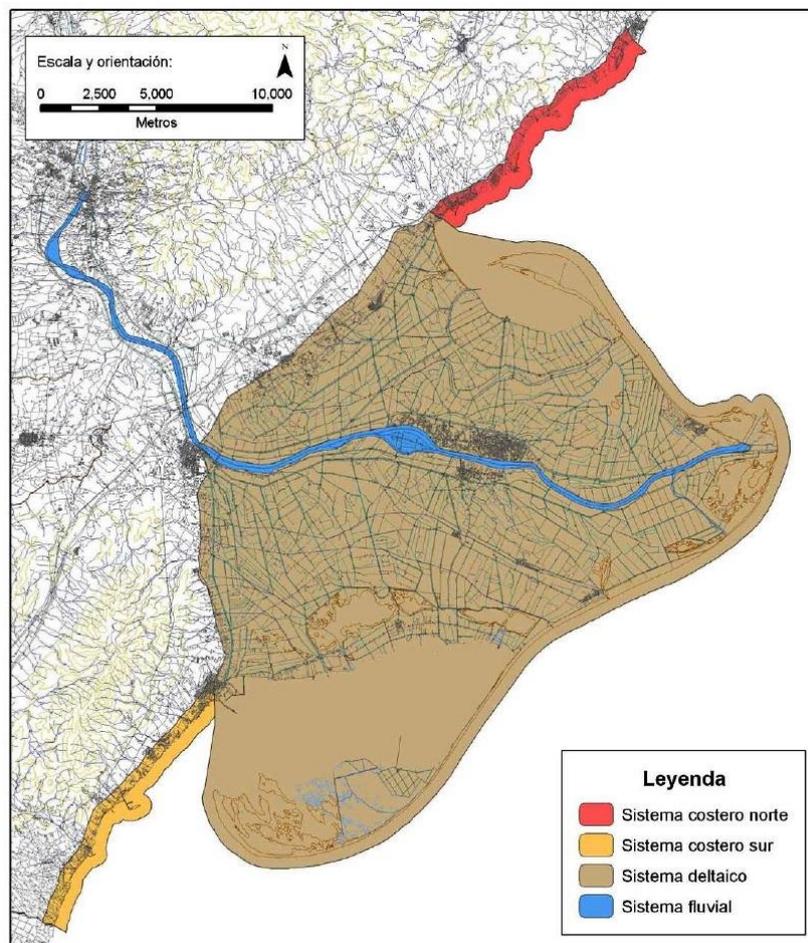


Figura 2.10: Unidades de gestión consideradas (Fuente: Taller de Ingeniería Ambiental, 2007)

A continuación realiza un “Análisis de las unidades de gestión” en el que trata las unidades en que se ha dividido (Figura 2.10); siendo éstas: 1) Sistema costero Ametlla-Ampolla, 2) Sistema deltaico; 3) Sistema costero Sant Carles-Alcanar; y 4) Sistema fluvial.

Del “Sistema deltaico” trata:

- 1) Localización de la unidad de gestión
- 2) Ficha de la componente física
- 3) Ficha de la componente natural
- 4) Ficha de la componente urbanística
- 5) Ficha de la componente socioeconómica
- 6) Análisis DAFO
- 7) Líneas de actuación

COMPONENTE FÍSICA

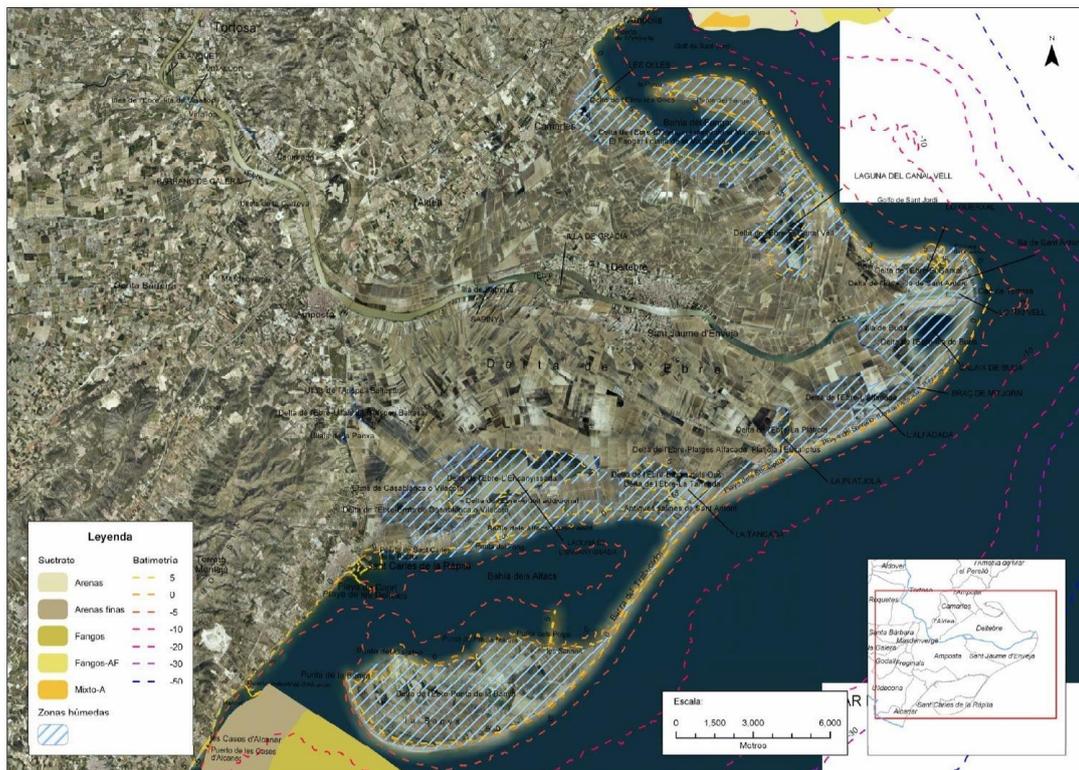


Figura 2.11: Componente física en la Estrategia (Fuente: Taller de Ingeniería Ambiental, 2007)

Evolución de la costa y dinámica de sedimentos

El estado evolutivo actual del delta del Ebro se basa en una situación dominada principalmente por el oleaje, y por el ascenso del nivel del mar. La influencia derivada de la capacidad de transporte sólido por parte del río Ebro ha disminuido. El balance neto de transporte medio a escala de décadas es, en general, de pérdida de sedimentos. En la Figura 2.12 se muestra el transporte de sedimentos y balance sedimentario que han tomado del LIM (Figura 2.2). Y en la Figura 2.13, la evolución de la costa desde 1947 hasta 1995

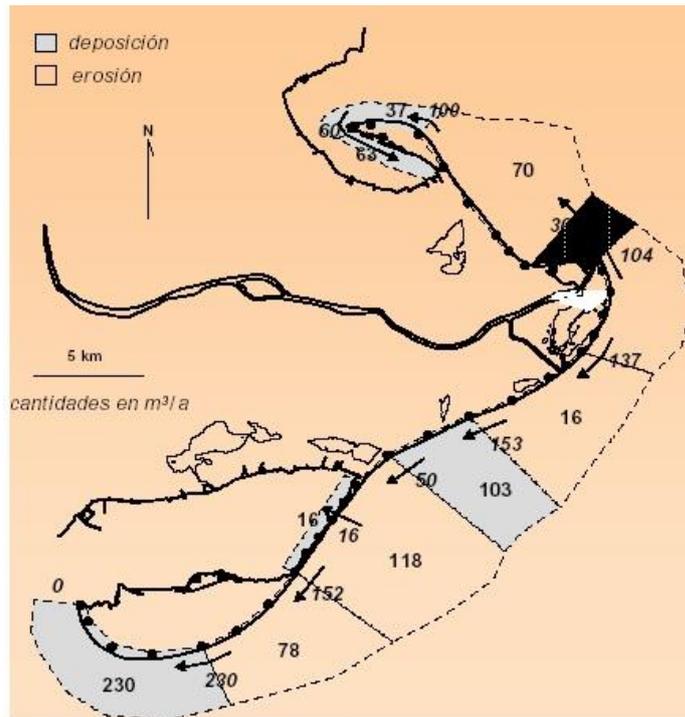


Figura 2.12: Transporte de sedimentos y balance sedimentario (Fuente: Taller de Ingeniería Ambiental, 2007)

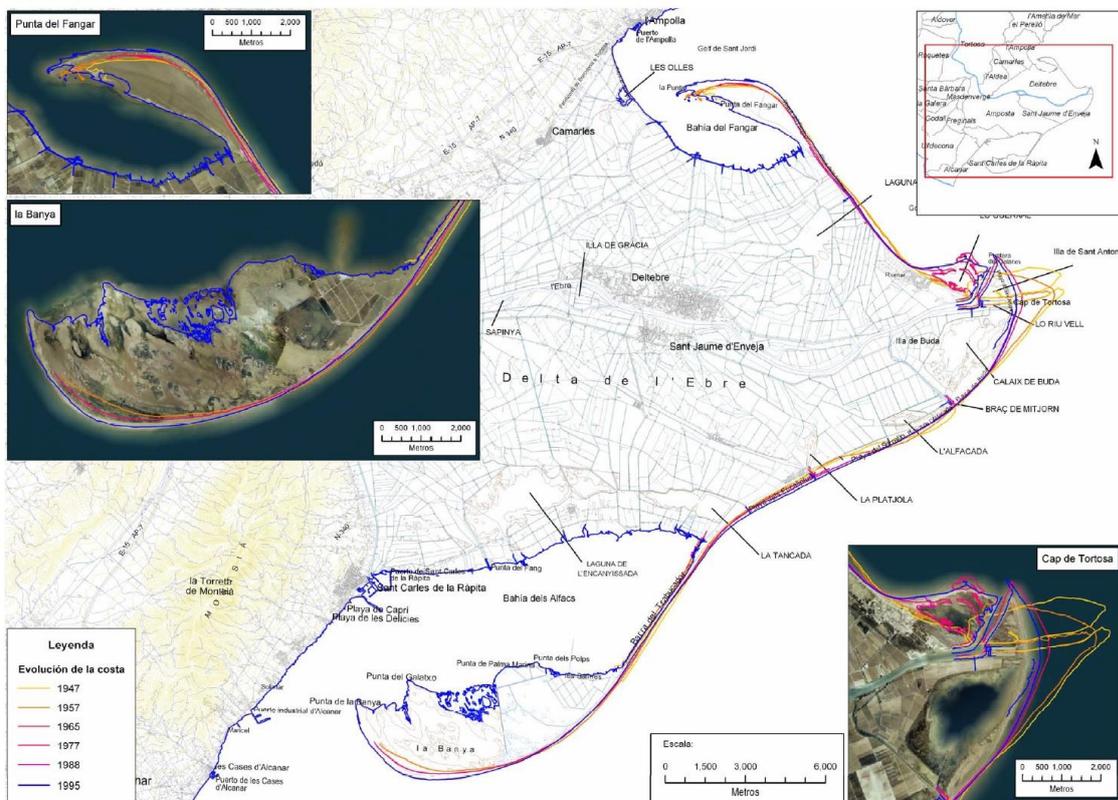


Figura 2.13: Evolución de la línea de costa (Fuente: Taller de Ingeniería Ambiental, 2007)



Subsidencia y ascenso del nivel del mar

La subida del nivel del mar se estima para el año 2.050, como mínimo, de 25 cm (considerando, 15 cm de aumento eustático del nivel del mar, 0,2 mm/año por subsidencia, y retroceso de la línea de costa).

El ascenso del nivel del mar tendrá un efecto directo sobre la línea de costa, produciendo un retroceso de la misma (regla de Bruun).

Diagnóstico

En el Delta, el conjunto de problemas detectados, se pueden sintetizar en dos grandes tipologías:

- 1- Pérdida de terrenos a gran escala: Subsidencia y ascenso del nivel del mar. Como consecuencia, se prevé un ascenso del nivel que será, como mínimo de 25 cm en el año 2050. Como consecuencia, puede desaparecer hasta el 50% de la llanura deltaica.
- 2- Erosión y regresión. Relacionado con el anterior, y con la ausencia de sedimentos.
 1. Barra del Trabucador, hasta la mitad de la Punta de la Banya
 2. Frente a la playa de la Alfacada
 3. Illa de Buda y caláis de Buda
 4. Playa de la Marquesa-Pals-Nen Perdut y de Riumar.
 5. La Illa de Sant Antoni y la Desembocadura
 6. El Garxal (en crecimiento hasta el año 1.995, a partir del cual se produce regresión)

COMPONENTE NATURAL

A continuación se analiza la componente natural, o ecosistemas que se encuentran en el conjunto del Delta, e indica que todos relacionados con la disponibilidad y el origen del agua:

- a. Lagunas: existen 8 lagunas costeras de naturaleza salobre.
- b. Bahía litoral: existen dos bahías, la del Fangar y la de Els Alfacs. La parte central y más profunda de El Fangar, cubierta por praderas de fanerógamas, proporciona refugio y alimentación a muchas especies marinas.
- c. Arrozales: constituyen el 70% del área total del Delta.
- d. Ullals: surgencias naturales de agua dulce.
- e. Salinas, saladares y marismas:
- f. Arenales, playas y sistemas dunares

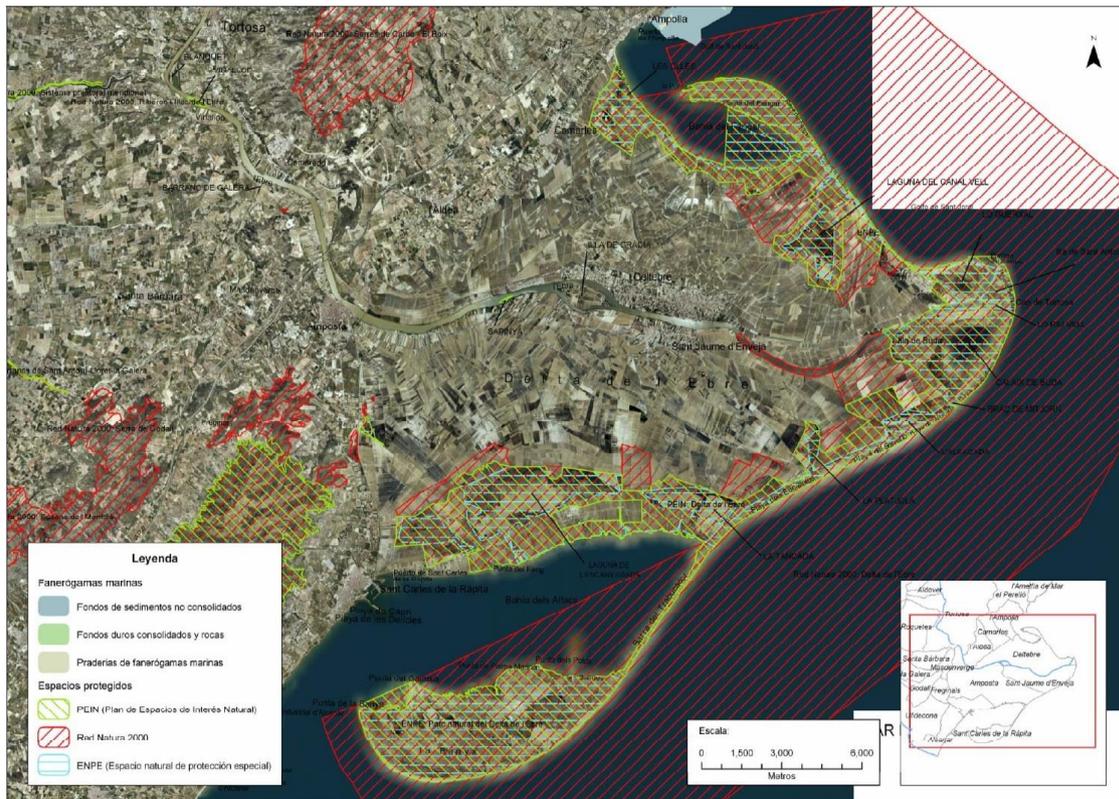


Figura 1.32: Componente natural (Fuente: Taller de Ingeniería Ambiental, 2007)

A continuación trata de las componentes urbanística y socioeconómica.

PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

Se realiza una serie de propuestas de actuación; siendo éstas:

Proyectos de restauración de zonas degradadas:

- Restauración de los terrenos afectados por el camping *Ampolla Playa*.
- Proyecto de restauración ambiental de la laguna de Les Olles y su entorno inmediato.
- Proyecto de restauración del sistema dunar de la playa de la Marquesa.

Protección y conservación de los sistemas litorales - Restauración de los terrenos afectados por el camping *l'Aube* de Riumar.

Mejora de la calidad de las aguas marinas

- Mejora de la calidad de las aguas vertidas a la bahía del Fangar mediante la instalación de filtros verdes y la regulación de efluentes.
- Mejora de la calidad de las aguas vertidas a la bahía dels Alfacs mediante la instalación de filtros verdes y la regulación de efluentes.

Control de los efectos del ascenso del nivel del mar

- Programa de indicadores ambientales para verificar el ascenso del nivel del mar en todo el ámbito deltaico.

Determinación de zonas inundables

- Realización de topografía y batimetría de detalle en todo el ámbito deltaico hasta la cota - 10 m.



- Aplicación de modelos matemáticos para la determinación de las zonas inundables tomando como referencia las previsiones del Panel del Cambio Climático sobre el ascenso del nivel del mar.

Adquisición de terrenos

- Adquisición para su adscripción al DPMT de los terrenos no urbanizables y urbanizables no delimitados en una franja de 500 m (zona de influencia de la Ley de Costas)

Actuaciones a desarrollar a partir de la determinación de zonas inundables

- Ajuste del deslinde del DPMT y de sus servidumbres a la situación prevista para el periodo analizado, en función de la posible compra de terrenos para su adscripción a DPMT

Actuaciones de desocupación del DPMT y sus servidumbres

- Desocupación de las instalaciones existentes en el margen sur de la bahía del Fangar que afectan al DPMT y a la ZST*.
- Desmantelamiento del restaurante *Los Vascos* en la playa de la Marquesa.
- Desmantelamiento de las instalaciones existentes en la gola este del río Ebro.
- Desocupación de las instalaciones existentes en el margen norte de la bahía dels Alfacs que afectan al DPMT y a la ZST.
- Desmantelamiento de la línea eléctrica y elementos de protección del vial de acceso a las salinas de Sant Antoni.

Regulación de actividades económicas

- Regulación de las actividades agrícolas en el entorno de la bahía del Fangar.
- Regulación de las actividades agrícolas en el entorno de la bahía dels Alfacs.
- Regulación de las actividades marisqueras en el entorno de la bahía del Fangar.
- Regulación de las actividades marisqueras en el entorno de la bahía dels Alfacs.
- Plan de explotación de las salinas de La Trinitat (Punta de la Banya).

Regulación de los usos sobre infraestructuras existentes

- Regulación del tránsito rodado en la barra del Trabucador.

Desmantelamiento de instalaciones e infraestructuras

- Desmantelamiento del camping *Ampolla Playa* frente a la playa del Arenal.
- Desmantelamiento del camping *l'Aube* de Riumar.

Propuestas de desclasificación del SUD* y del SUND

- Desclasificación de los sectores del SUD de Riumar.
- Desclasificación de los sectores del SUD de Els Eucaliptus

Protección del frente litoral

- Estudio de actuaciones de protección del frente litoral en zonas concretas.
- Estudio de posibilidades de reubicación de núcleos urbanos consolidados.

2.1.3 “Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña. Número 1: el Delta del Ebro. Documento de síntesis” (Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge, 2008)

Este documento, es un monográfico sobre los efectos esperables producidos por el cambio climático. Está formalmente estructurado en ocho capítulos. Los tres primeros son generales, abordando la Presentación que diseña el esquema general del trabajo (Figura 2.15); La descripción del Delta del Ebro (Figura 2.16); Y un análisis muy general de las variables físicas que afectan al Delta (Climáticas, caudales del río, y climáticas marinas).

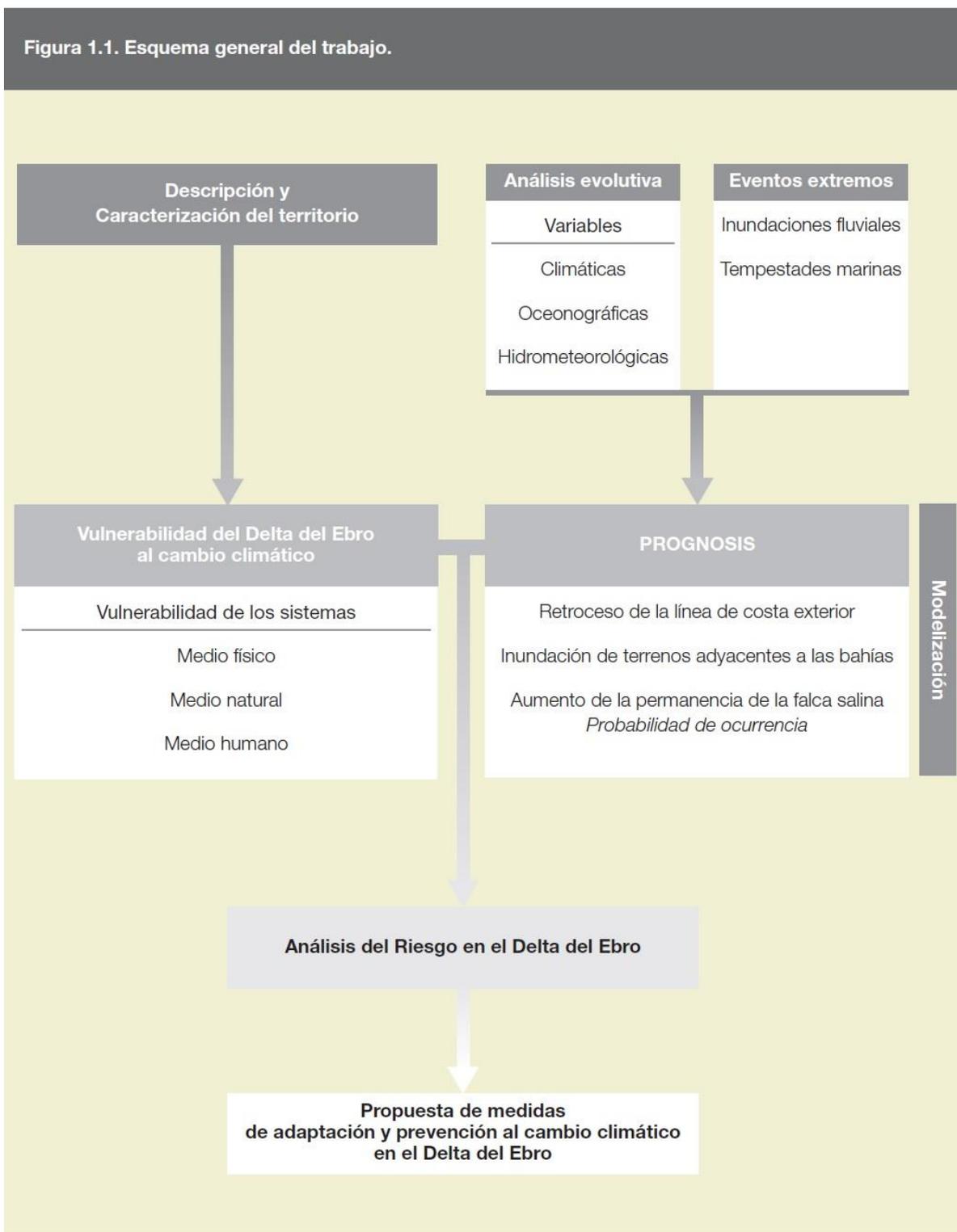


Figura 2.15: Esquema general del estudio (Fuente: GENCAT, 2008)

Figura 2.1.1. Espacios protegidos. Fuente: Departamento de Medio Ambiente y Vivienda.



Figura 2.16: Espacios protegidos y protección (Fuente: GENCAT, 2008)

El cuarto capítulo se dedica a “Catálogo de episodios” es interesante dado que no suele ser frecuente que aparezca este dato en los diversos trabajos de este tipo. Y se resume en la Figura 2.17.



Tabla 4.1. Episodios históricos de riadas (izquierda) y tempestades (derecha) en el Delta del Ebro.

Riadas	Comentarios	Riadas	Comentarios	Tempestades	Comentarios
s.XIV		s.XX		s.XVIII	
1380		1907	la segunda más grande de la historia	1779	ruptura Volquete
s.XV		1914		s.XX	
1488		1937		1920's	ruptura Volquete
s.XVI		1959		1940's	ruptura Volquete
1532		1960	tres en total	1948	
1582		1961	dos en total	1958	dos en total
s.XVII		1962		1960	dos en total
1605		1967		1962	
1617		1969	dos en total	1963	
1625		1970		1965	
1700		1971		1967	dos en total
s.XVIII		1972		1971	
1717		1974		1972	
1743		1977		1973	
1772		1978		1975	
1773		1979	dos en total	1978	
1783		1982		1980	
1787	la mayor de la historia	1997	dos en total	1982	
s.XIX		2001		1985	
1826				1990	
1845				1992	
1853				1995	
1865				1997	tres en total
1866				2000	
1871				2001	dos en total
1884					

Figura 2.17: Episodios climáticos fluviales y marinos que han afectado al Delta (Fuente: GENCAT, 2008)

El capítulo 5 se dedica a: “Estudio de la vulnerabilidad del Delta del Ebro frente a los efectos del cambio climático”. Para ello primero hace una completa definición de lo que entienden por “Vulnerabilidad” y se estudia para los siguientes sistemas:

- i. Vulnerabilidad del sistema físico
- ii. Vulnerabilidad del sistema natural
- iii. Vulnerabilidad del entorno humano

2.1.3.1 Vulnerabilidad del sistema físico

Los potenciales cambios ambientales y afectación en los componentes del sistema físico son:

- 1- Falta de transporte de sedimentos por el río Ebro: Este proceso no está directamente ligado al cambio climático, pero puede empeorar sus efectos.
- 2- Subsistencia de la plana deltaica: Este constituye uno de los problemas ambientales que afectan de forma global al medio físico del Delta; la tasa de subsistencia media se ha estimado en 2 mm/año. Una costa en la cual se da acreción vertical de sedimentos presenta una capacidad de respuesta al ascenso del nivel del mar que no presenta una costa en que la acreción no se da, como es el caso del Delta del Ebro (Figura 2.18).

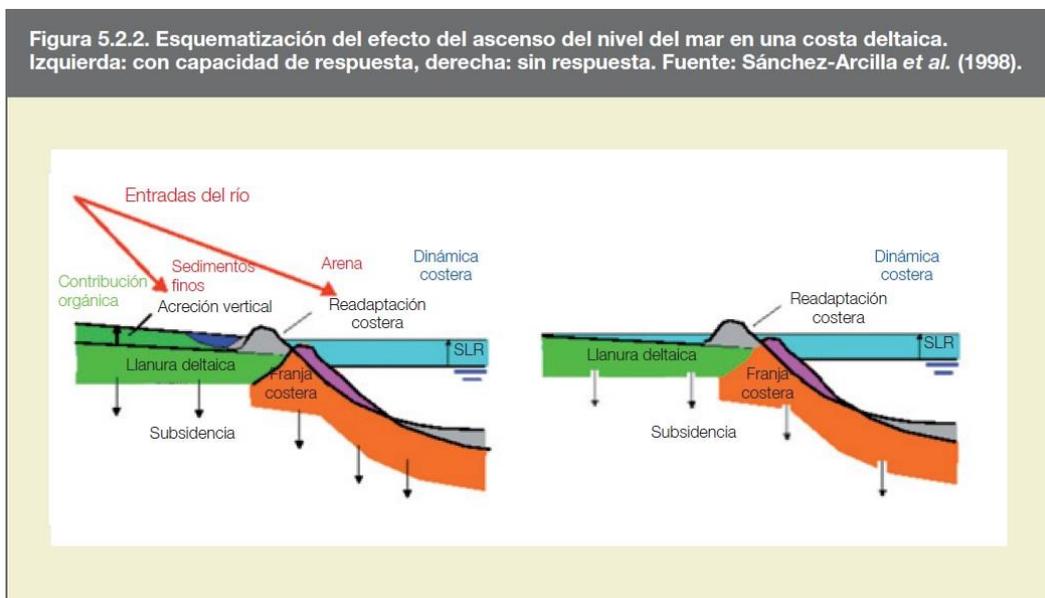


Figura 2.18: Diferencia en la adaptación al cambio climático con capacidad y sin capacidad de respuesta del perfil de playa (Fuente: GENCAT, 2008)

- 3- Evolución de la línea de costa: El aumento del nivel del mar afectará la evolución de la línea de costa exterior de la plana deltaica del Ebro. Considerando que el Delta del Ebro, debido a su origen geomorfológico, presenta una orografía prácticamente plana, con cotas que están por debajo del nivel del mar, la pérdida de terrenos por aumento del nivel del mar pasa a ser una de las consecuencias más relevantes de los efectos del calentamiento global al Delta del Ebro.
- 4- Ocurrencia de tempestades:
 - a. Las zonas que hasta ahora se han visto más afectadas por el efecto de las tempestades son las que lo seguirán siendo en el futuro (Marquesa y Riumar, y la zona entre L'Alfacada y El Trabucador).
 - b. La altitud del oleaje tiende a aumentar ligeramente frente a la punta de la Banya.



- c. La duración de las tempestades podría disminuir el Hemidelta norte, y aumentar en el sur.
- 5- Presencia y permanencia de la falca salina: Como consecuencia del cambio climático, se espera tanto un aumento del nivel del mar como una disminución de los caudales del río Ebro. Estos efectos serían sinérgicos por lo que respecta a la falca salina, es decir, ambos potenciarían un aumento en la presencia y permanencia de ésta.
 - 6- Variación de las variables climáticas: Algunos componentes del medio físico, y en particular las masas de agua, pueden padecer variaciones de sus características fisicoquímicas.
 - 7- Reducción de los caudales del río Ebro: se esperan reducciones del régimen de caudales en Tortosa de entre el 10% y el 20% a lo largo del s. XXI.
 - 8- Inundaciones fluviales: Podrían darse inundaciones temporales de los terrenos adyacentes al río Ebro por crecidas de éste, relacionadas con un incremento de la torrencialidad de las lluvias.

Capacidad de los componentes del sistema físico de hacer frente a los cambios se basa en:

- 1- Medida de la plana deltaica: La disponibilidad de superficie en el Delta del Ebro permite la reproducción o la compensación de las pérdidas de algunos de los componentes del sistema físico de forma natural o mediante medidas de intervención directa.
- 2- Bajo grado de rigidización de la costa y la plana deltaica
- 3- Mantenimiento del perfil activo de las playas: Uso de la regla de Bruun [la figura que aparece no es la regla de Bruun sino de Kriebel y Dean].
- 4- Evolución de las barras litorales y bahías: comportan cierta capacidad de protección de las franjas de terrenos costeros [no contempla la transformación o desaparición de la barra].
- 5- Orografía de la plana deltaica:

2.1.3.2 Vulnerabilidad de los sistemas naturales

El valor intrínseco de los sistemas naturales se resume en las tablas que se muestran en las figuras 2.19 a 2.22. En ellas se muestran las figuras de protección legal, especies de especial interés y hábitats de interés comunitario en los sistemas marinos, terrestre, y aguas continentales y sistemas limnéticos del Delta del Ebro.

Tabla 5.3.1. Figuras de protección legal, especies de especial interés y hábitats de interés comunitario en los sistemas marinos del Delta del Ebro.			
Sistemas naturales	Protección del espacio	Hábitats y especies de interés particular	Valor intrínseco
Marinos			
Franja litoral	XN2000: Delta de l'Ebre	Presencia de <i>Posidonia oceanica</i> , <i>Cymodocea nodosa</i> , <i>Zostera noltii</i> (especies protegidas a nivel autonómico mediante Orden de 31 de julio de 1991. Fuente: Biocat, Banco de Datos de Biodiversidad)	Muy alto
		Presencia de <i>Caretta caretta</i> (protegida a nivel autonómico mediante Ley 12/2006; a nivel estatal por el RD 439/1990; incluida en el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas; recogida en los anejos II y IV de la Directiva Hábitats. Fuente: Biocat, Banco de Datos de Biodiversidad)	
		Está presente en el HIC prioritario <i>Posidonia oceanica</i> (1120*), (cartografía temática aún no elaborada)	
Estuario	PEIN y XN 2000	Especies de ictiofauna autóctonas y protegidas como <i>Acipenser sturio</i> , <i>Alosa alosa</i> , <i>Alosa fallax</i> , <i>Barbus graellsii</i> , <i>Gasterosteus aculeatus</i> , <i>Petromyzon marinus</i> , <i>Salapia fluviatilis</i> (endémica), y <i>Syngnathus abaster</i>	Muy alto
Bahías	bahía del Fangar: XN 2000, PEIN (parcial), ENPE (parcial), bahía dels Alfacs: XN 2000 (parcial)	Presencia de <i>Cymodocea nodosa</i> , <i>Zostera noltii</i> (especies protegidas a nivel autonómico mediante Orden de 31 de julio de 1991. Fuente: Biocat, Banco de Datos de Biodiversidad y Mapa de la vegetación sumergida de la bahía dels Alfacs. Pérez <i>et al.</i> , 2006)	Fangar: Muy alto
		Presencia de <i>Caretta caretta</i> (protegida a nivel autonómico mediante Ley 12/2006; a nivel estatal por el RD 439/1990; incluida en el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas; recogida en los anejos II y IV de la Directiva Hábitats. Fuente: Biocat, Banco de Datos de Biodiversidad)	Alfacs: Muy alto y Alto (fuera de figuras de protección)
		Presencia de <i>Sterna hirundo</i> y <i>Sterna nilotica</i> (especies protegidas a nivel autonómico mediante Ley 22/2003)	

Figura 2.19 (Fuente: GENCAT, 2008)



PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

Anejo 5. Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro

CEDEX

Tabla 5.3.2. Figuras de protección legal, especies de especial interés y hábitats de interés comunitario en los sistemas terrestres del Delta del Ebro.

Sistemas naturales	Protección del espacio	Hábitats y especies de interés particular	Valor intrínseco
Terrestres			
Dunar	XN 2000, PEIN, ENPE	<p>Dunas móviles embrionarias (HIC no prioritario 2110)</p> <p>Dunas móviles del cordón litoral, con <i>Ammophila arenaria</i> (HIC no prioritario 2120)</p> <p>Dunas litorales fijas con comunidades del <i>Crucianellion maritimae</i> (HIC no prioritario 2210)</p> <p>Dunas con cubierta de <i>Malcomietalia</i> (HIC no prioritario 2230)</p> <p>Vegetación psamófila, especializada en este tipo de hábitats. Destacan especies como <i>Limoniastrum monopetalum</i> (vulnerable a Cat.; protegida por el Decreto 328/1992)</p> <p>Avifauna nidificante: <i>Charadrius alexandrinus</i> (principal población ibérica, vulnerable en Cat.), <i>Sterna nilotica</i> (en peligro en Eur.), <i>Haematopus ostralegus</i> (vulnerable en Cat.), <i>Sterna hirundo</i> (vulnerable en Cat.), <i>Sterna albifrons</i> (en peligro en Cat.)</p>	Muy alto
Sistemas halobios: saladas, marismas y salinas	(localizaciones especificadas debajo)	<p>Comunidades de Salicorn y otras plantas anuales, colonizadoras de suelos arcillosos o arenosos salinos (HIC no prioritario 1310)</p> <p>Prados de espartina (HIC no prioritario 1320)</p> <p>Pastizales mediterráneos halinos (<i>Juncatella maritimi</i>) (HIC no prioritario 1410)</p> <p>Matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos (<i>Sarcocometea fruticosae</i>) (HIC no prioritario 1420)</p> <p>Matorrales halonitrófilos (<i>Pegano-Salsoletea</i>) (HIC no prioritario 1430)</p> <p>Comunidades halófilas de suelos de humedad muy fluctuante (HIC prioritario 1510)</p>	Muy alto
Playas de L'Alfacada, la Platjola y Els Eucaliptus, y yermos de La Tancada	XN 2000, PEIN, ENPE	<p>Flora: <i>Zygophyllum album</i> (vulnerable en Cat. y España), <i>Spergularia rubra</i> subsp. <i>heildreichii</i>, <i>Limonium densissimum</i> (vulnerable en Cat. y en Esp.), <i>L. girardianum</i>, <i>L. ferulaceum</i></p> <p>Avifauna nidificante: <i>Glaucolara pratincola</i> (en peligro en Cat. y en Eur.; sólo nidifica en el Delta), <i>Sterna albifrons</i> (en peligro en Cat.), <i>Haematopus ostralegus</i> (vulnerable en Cat.), <i>Charadrius alexandrinus</i> (vulnerable en Cat.), <i>Calandrella brachydactyla</i> (en peligro en Cat., vulnerable en Eur.), <i>C. rufescens</i> (vulnerable en Cat. y Eur.)</p>	Muy alto
Punta de la Banya	XN 2000, PEIN, ENPE	<p>Flora: <i>Zygophyllum album</i> (vulnerable en Cat. y Esp.)</p> <p>Avifauna nidificante: <i>Larus audouinii</i> (vulnerable en Cat.), <i>L. fuscus</i> (vulnerable en Cat.), <i>L. genei</i> (vulnerable en Cat.), <i>Sterna sandvicensis</i> (vulnerable en Cat.), <i>S. albifrons</i> (en peligro en Cat.), <i>Charadrius alexandrinus</i> (principal población ibérica, vulnerable en Cat.), <i>Tringa totanus</i> (en peligro en Cat.), <i>Haematopus ostralegus</i> (vulnerable en Cat.), <i>Tadorna tadorna</i> (vulnerable en Cat.)</p>	Muy alto
Arrozales	Sólo parte de la superficie de arrozales que está en la franja de terrenos costero de la plana deltaica está protegida (XN 2000, PEIN, ENPE)	<p>Avifauna: hábitat para anátidos hibernantes y limícolas</p> <p>Herpetofauna: <i>Mauremys leprosa</i> (vulnerable en Esp.) y <i>Emys orbicularis</i> (en peligro en Esp.)</p> <p>Especies de flora protegidas: <i>Lindernia dubia</i>, <i>Marsilea quadrifolia</i> y <i>Bergia capensis</i></p>	Medio/Bajo

Figura 2.20: (Fuente: GENCAT, 2008)

Tabla 5.3.3. Figuras de protección legal, especies de especial interés y hábitats de interés comunitario en las aguas continentales y sistemas limnéticos del Delta del Ebro (I).

Sistemas naturales	Protección del espacio	Hábitats y especies de interés particular	Valor intrínseco
Aguas continentales y sistemas limnéticos			
Sistema fluvial		Alamedas, saucedas y otros bosques de ribera (HIC no prioritario 92A0) Flora: especies protegidas como <i>Fraxinus angustifolia</i> subsp. <i>oxycarpa</i> y <i>Lonicera biflora</i> Ictiofauna: especies autóctonas y protegidas como <i>Acipenser sturio</i> , <i>Alosa alosa</i> , <i>Alosa fallax</i> , <i>Barbus graellsii</i> , <i>Gasterosteus aculeatus</i> , <i>Petromyzon marinus</i> , <i>Salaria fluviatilis</i> (endémica), y <i>Syngnathus abaster</i> , <i>Chondrostoma miegii</i> , <i>Cobitis paludica</i> (endémica)	Alto
Lagunas litorales	(localizaciones especificadas debajo)	Lagunas litorales (HIC prioritario 1150*) Flora: macrófitos como <i>Ruppia cirrosa</i> y <i>Potamogeton pectinatus</i> dentro del agua; cinturones de helófitos en los alrededores Avifauna: <i>Chlidonias hybridus</i> (vulnerable en Cat.), <i>Sterna nilotica</i> (en peligro en Eur.), <i>Circus aeruginosus</i> (vulnerable en Cat.), <i>Ardeola ralloides</i> (vulnerable en Eur.), <i>Botaurus stellaris</i> (en peligro crítico en Cat.)	
Les Olles	XN 2000, PEIN, ENPE	Avifauna: <i>Ardeola ralloides</i> (vulnerable en Eur.), <i>Locustella luscinioides</i> (en peligro en Cat.) Ictiofauna: <i>Anguilla anguilla</i> (vulnerable en Esp.)	
El Canal Vell	XN 2000, PEIN, ENPE Parque Natural y también Reserva de Fauna Salvaje, (el extremo noreste)	Estanques naturales eutróficos con vegetación flotante (<i>Hydrocharition</i>) o poblaciones sumergidas de espigas de agua (<i>Potamion</i>) (HIC no prioritario 3150) Ictiofauna: <i>Aphanius iberus</i> (en peligro de extinción y protegida mediante Ley 12/2006; RD 439/90 y Directiva de Hábitats); <i>Anguilla anguilla</i> (vulnerable en Esp.) Herpetofauna: <i>Emys orbicularis</i> (vulnerable) Avifauna: <i>Botaurus stellaris</i> (en peligro crítico en Cat.), <i>Alcedo atthis</i> (vulnerable en Cat.), <i>Emberiza schoeniclus</i> (en peligro crítico en Cat.), <i>Ixobrychus minutus</i> (cercana a la amenaza), <i>Ardeola ralloides</i> (cercana a la amenaza), <i>Egretta garzetta</i> (cercana a la amenaza), <i>Chlidonias hybridus</i> (vulnerable en Cat.), <i>Locustella luscinioides</i> (en peligro en Cat.)	Muy Alto
El Garxal	XN 2000, PEIN, ENPE Parque Natural y también Reserva de Fauna Salvaje, (cinturón alrededor del área privada de caza)	Dunas móviles embrionarias (HIC no prioritario 2110) Estanques naturales eutróficos con vegetación flotante (<i>Hydrocharition</i>) o poblaciones sumergidas de espigas de agua (<i>Potamion</i>) (HIC no prioritario 3150) Avifauna nidificante: <i>Ardea purpurea</i> , <i>Ixobrychus minutus</i> o <i>Chlidonias hybridus</i>	

Figura 2.21: (Fuente: GENCAT, 2008)



PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

Anejo 5. Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro

CEDEX

Sistemas naturales	Protección del espacio	Hábitats y especies de interés particular	Valor intrínseco
Aguas continentales y sistemas limnéticos			
El Calaix de Buda/ els Calaixos de Buda	XN 2000, PEIN, ENPE Parque Natural y también Reserva de Fauna Salvaje (parcial)	Estanques naturales eutróficos con vegetación flotante (<i>Hydrocharition</i>) o poblaciones sumergidas de espigas de agua (<i>Potamion</i>) (HIC no prioritario 3150)	Muy Alto
		Matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos (<i>Sarcocometea fruticosae</i>) (HIC no prioritario 1420)	
		Flora: <i>Zygophyllum album</i> (vulnerable en Cat. y en Esp.), <i>Limonium vigoí</i> (endemismo; en este núcleo se concentran más del 99% de individuos de la especie)	
L'Alfacada	XN 2000, PEIN, ENPE	Estanques naturales eutróficos con vegetación flotante (<i>Hydrocharition</i>) o poblaciones sumergidas de espigas de agua (<i>Potamion</i>) (HIC no prioritario 3150)	
		Avifauna nidificante: <i>Chlidonias hybrida</i> (vulnerable en Cat.), <i>Acrocephalus melanopogon</i> (vulnerable en Cat.), <i>Locustella luscinioidea</i> (en peligro en Cat.)	
La Platjola	XN 2000, PEIN, ENPE	Avifauna nidificante: <i>Ixobrychus minutus</i> (vulnerable en Eur.) y esporádicamente <i>Botaurus stellaris</i> (en peligro crítico en Cat., vulnerable en Eur.), <i>Locustella luscinioidea</i> (en peligro en Cat.), <i>Emberiza schoeniclus</i> (en peligro crítico en Cat.)	
		Dormidor de <i>Circus aeruginosus</i> en invierno	
La Tancada	XN 2000, PEIN, ENPE Parque Natural y también Reserva de Fauna Salvaje	Matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos (<i>Sarcocometea fruticosae</i>) (HIC no prioritario 1420)	
		Avifauna nidificante: <i>Sterna nilotica</i> (en peligro en Eur.), <i>Tringa totanus</i> (en peligro en Cat.), <i>Sterna hirundo</i> (vulnerable en Cat.)	
L'Encanyissada	XN 2000, PEIN, ENPE	Pastizales mediterráneos halinos (<i>Juncetalia maritimi</i>) (HIC no prioritario 1410)	
		Matorrales halófilos mediterráneos y termoatlánticos (<i>Sarcocometea fruticosae</i>) (HIC no prioritario 1420)	
		Estanques naturales eutróficos con vegetación flotante (<i>Hydrocharition</i>) o poblaciones sumergidas de espigas de agua (<i>Potamion</i>) (HIC no prioritario 3150)	
		Flora: <i>Najas marina</i> (bastante raro)	
		Avifauna nidificante: <i>Botaurus stellaris</i> (en peligro crítico en Cat.), <i>Netta rufina</i> (vulnerable en Cat.), <i>Circus aeruginosus</i> (vulnerable en Cat.), <i>Chlidonias hybrida</i> (vulnerable en cat.)	
Herpetofauna: <i>Emys orbicularis</i>			
Ojales y marjales	XN 2009, PEIN (parcial), ENPE (parcial)	Aguas estancadas oligomesotróficas, duras, con vegetación bentónica de caroficias (HIC no prioritario 3140), en los ojales de Tronc	Muy Alto
		Estanques naturales eutróficos con vegetación flotante (<i>Hydrocharition</i>) o poblaciones sumergidas de espigas de agua (<i>Potamion</i>) (HIC no prioritario 3150)	
		Turberas calcáreas con <i>Cladium mariscus</i> (HIC prioritario 7210*), en los ojales del Tronc	
		Flora: <i>Iris xiphium</i> (muy raro en Cat.), los ojales de la Panxa	
		Fauna: <i>Phagocata ullala</i> (planaria; único animal endémico del Delta), los ojales de l'Aríspe y Baltasar	
		Ictiofauna: <i>Gobio gobio</i> (autóctono en el Ebro), <i>Cobitis paludica</i> (endemismo ibérico, vulnerable en Esp.), <i>Gasterosteus aculeatus</i> (protegido en Cat., vulnerable en Esp.), <i>Valencia hispanica</i> (endemismo entre el Delta y el norte de Alicante, en peligro en Esp.)	
Herpetofauna: <i>Emys orbicularis</i> , <i>Mauremys leprosa</i>			

Figura 2.22: (Fuente: GENCAT, 2008)



Los potenciales cambios ambientales y afectación a los componentes del sistema natural serían:

- 1- Pérdidas de patrimonio natural por aumento del nivel del mar.
- 2- Cambios en los sistemas naturales derivados de los cambios en las variables climáticas: Aumento de la evaporación en masas de agua, de la transpiración en vegetales y de las tasas biogeoquímicas y metabólicas; Variación de la solubilidad de gases en agua y de sus concentraciones de saturación; y disminución de la recarga hídrica de los acuíferos y ecosistemas acuáticos. Que comportan cambios en las características de los componentes abióticos y bióticos de los ecosistemas (Figuras 2.23 a 2.25).

Tabla 5.3.5. Afectación a los sistemas terrestres del Delta del Ebro derivada de los cambios en las variables climáticas.

	Cambios en las características estructurales	Cambios en las características funcionales	Cambios en la biota
Dunar	Aumento de la temperatura de la arena		Posibles extinciones locales de especies
	Cambios en la dirección del viento? Cambios en la forma de los sistemas dunares		
Halobios: saladares, marismas, salinas	Aumento de la temperatura del suelo		Posibles extinciones locales de especies
	Mayor evapotranspiración: fases secas más frecuentes y prolongadas		
Arrozales	Aumento de las tasas de evapotranspiración	Requerimientos hídricos más elevados	
	Aumento de la temperatura en el agua		

Figura 2.23: (Fuente: GENCAT, 2008)



Tabla 5.3.6. Afectación a los sistemas marinos del Delta del Ebro derivada de los cambios en las variables climáticas.

	Cambios en las características estructurales	Cambios en las características funcionales	Cambios en la biota
Franja litoral	Aumento de la temperatura del agua	Cambios en las relaciones tróficas derivadas del cambio de ciclo anual (mayor duración del reposo) en fitoplancton	Mayor duración temporal del periodo de reposo veraniego del fitoplancton (poblaciones poco densas, biomasa baja, etc)
	Termoclina situada a mayor profundidad, y de mayor duración temporal	Cambios de productividad	Cambios en los patrones de presencia, abundancia y distribución de especies derivadas de los cambios de temperatura: mortalidad de especies (especialmente en episodios de temperaturas anormalmente altas), establecimiento/aumento de abundancia de especies termófilas, proliferaciones de algas
	Acidificación del agua de mar (absorción de mayores cantidades de CO ₂)		Posibles brotes de patógenos, dado que la mayoría de ellos son sensibles a la temperatura
			Impacto negativo de la acidificación del agua en organismos con exoesqueletos calcáreos
Estuario	Aumento de la temperatura del agua	Cambios de productividad	Posibles brotes de patógenos, dado que la mayoría de ellos son sensibles a la temperatura
	Acidificación del agua de mar (absorción de mayores cantidades de CO ₂)		
Bahías	Aumento de la temperatura del agua	El aumento de temperatura favorece las tasas biogeoquímicas y metabólicas (p.e. degradación de la materia orgánica)	Cambios en los patrones de presencia, abundancia y distribución de especies derivados de los cambios de temperatura: mortalidad de especies (especialmente en episodios de temperaturas anormalmente altas), establecimiento/aumento de abundancia de especies termófilas, proliferaciones de algas
	Acidificación del agua de mar (absorción de mayores cantidades de CO ₂)	Mayor riesgo de anoxia	
	Si se dan disminuciones de las entradas de agua dulce (?): aumento de la salinidad, cambios en estratificación y en tiempo de renovación del agua	Cambios en la tasa de renovación del agua	Impacto negativo de la acidificación del agua en organismos con exoesqueletos calcáreos, como los moluscos (acuicultura)
		Cambios en la productividad	Posibles brotes de patógenos, dado que la mayoría de ellos son sensibles a la temperatura

Figura 2.24: (Fuente: GENCAT, 2008)

Tabla 5.3.7. Afectación a las aguas continentales y sistemas limnéticos del Delta del Ebro derivada de los cambios en las variables climáticas.

	Cambios en las características estructurales	Cambios en las características funcionales	Cambios en la biota
Sistema fluvial	Variaciones en el caudal	Cambios de productividad	Cambios en los patrones de presencia, abundancia y distribución de especies derivados de los cambios de temperatura: mortalidad de especies (especialmente en episodios de temperaturas anormalmente altas), establecimiento/aumento de abundancia de especies termófilas, proliferaciones de algas
	Aumento de la temperatura del agua		Posibles brotes de patógenos, dado que la mayoría de ellos son sensibles a la temperatura
Marjales	Disminución de la recarga hídrica del acuífero	Reducción/Pérdida del afloramiento de agua	Posibles extinciones locales de especies
Lagunas litorales	Mayor temperatura del agua	Incremento de la productividad primaria y de las tasas de degradación de la materia orgánica (con el subsiguiente aumento de las emisiones de gases en la atmósfera, etc)	Cambios en los patrones de presencia, abundancia y distribución de especies derivados de los cambios de temperatura: mortalidad de especies (especialmente en episodios de temperaturas anormalmente altas), establecimiento/aumento de abundancia de especies termófilas (algunas oportunistas o exóticas invasoras), proliferaciones de algas, disminución de abundancia de los macrófitos sumergidos
	Mayor riesgo de anoxia, ya que las temperaturas más elevadas reducen las concentraciones de saturación de oxígeno disuelto	Episodios de eutrofización y anoxia más frecuentes y/o prolongados (por episodios de precipitación intensa que comportan inputs de nutrientes desde los arrozales; mayores concentraciones de nutrientes al aumentar la evaporación, si no se aumentan proporcionalmente los inputs de agua)	Cambios en los patrones de presencia, abundancia y distribución de especies derivados de los cambios de salinidad: ganan en dominio <i>Phragmites</i> y <i>Scirpus</i> ante <i>Typha</i> o <i>Cladium</i> (también supone un cambio hacia spp anfíbios en vez de acuáticas), desaparición de especies endémicas como <i>Margaritifera</i> y <i>Ephoron</i> (incremento de la salinidad en primavera)
	Aumento de salinidad por aumento de evaporación (y por intrusión salina y menores aportaciones de agua dulce de los arrozales en caso de no aumentarse las dotaciones de agua en los mismos)	Modificaciones de las relaciones entre especies (p.e. tróficas y competitivas)	Inestabilización de las poblaciones de macroinvertebrados
	Reducción de la medida (extensión, profundidad) y/o aceleración de la desaparición de la laguna por cambios en el balance hídrico (mayor evaporación, aportaciones de agua dulce proporcionalmente menores en caso de no aumentarse la dotación de agua de riego de los arrozales)		Aumento del dominio, por tanto reducción de la diversidad global
Ojales	Disminución de la recarga hídrica del acuífero	Reducción/Pérdida del afloramiento de agua	Posibles extinciones locales de especies

Figura 2.25: (Fuente: GENCAT, 2008)



La capacidad de los sistemas naturales de hacer frente a los cambios (de taponar, de recuperarse o adaptarse a los potenciales cambios ambientales) son:

- 1- Retroceso de playas, sistemas dunares y marismas: Sufrirán un retroceso progresivo tierra adentro, siempre y cuando haya espacio disponible y no existan estructuras antrópicas que lo interrumpan.
- 2- Medida y relación superficie/volumen en lagunas: Las lagunas litorales sufrirán una serie de cambios en las características del medio físico, como el aumento de las entradas de arena y de agua salada.
- 3- Regulación antrópica en lagunas y bahías: En estos sistemas naturales, existe la potencialidad de regularlos antrópicamente.
- 4- Capacidad de cambio y adaptabilidad global: Desaparición física de algunos hábitats; Aparición de otros hábitats nuevos; Cambio en las condiciones fisicoquímicas del hábitat; y consecuentemente, sucesión de especies y adaptación a sus nuevas condiciones.

2.1.3.3 Vulnerabilidad del sistema humano

Valor intrínseco:

- 1- Los núcleos urbanos y las infraestructuras portuarias.
- 2- El turismo.

Potenciales cambios ambientales y afectación a los componentes del sistema humano:

- 1- Pérdidas de patrimonio por aumento del nivel del mar.
- 2- Cambios en las condiciones sanitarias y ambientales derivados de cambios en las variables climáticas.
- 3- Cambios en la competitividad de las actividades económicas derivadas de cambios en las variables climáticas.

2.1.3.4 Prognosis de la línea de costa exterior del Delta

El análisis de la evolución futura de la línea de costa del Delta Para la variable cota de inundación se aplica un sistema híbrido, consistente en la extrapolación de las tendencias de largo plazo de las dinámicas marinas (oleaje y marea meteorológica en el año 2050) y en la proyección de ascenso de nivel medio del mar global para el escenario A1B del IPCC (escenario promedio) para el año 2050: 15 cm de subida. Además, se hace una prognosis para el año 2100 para el escenario A1B con un ascenso de 40 cm y para un escenario que se ha considerado pesimista, el cual consiste en una sobre elevación del nivel medio del mar de 100 cm.

Trata de la evolución de la línea de costa a lo largo del siglo XX, para ello utiliza datos del LIM, e indica: Actualmente se da una tendencia sedimentaria en las dos flechas litorales,

mientras que las zonas situadas entre el lóbulo y las flechas actúan como zonas de trasvase de sedimento, esto es:

- Cap Tortosa está en proceso de erosión.
- El Fangar y la Banya son zonas receptoras de sedimento.
- Las zonas del Trabucador y Eucaliptus-Migjorn son de tránsito del sedimento que procede de Cap Tortosa y se dirige hacia la Banya.
- La zona Marquesa-Riumar es de tránsito del sedimento que procede de Cap Tortosa y se dirige hacia el Fangar.

Muestra un balance sedimentario (Figura 2.26), diferente del realizado por el LIM (2000).



Figura 2.26: (Fuente: GENCAT, 2008)

Y hace una previsión, con los datos de la Figura 2.26 de los cambios que prevén se producirán en todo el frente del Delta (Figura 2.27).



CEDEX

Tabla 6.1.1. Retroceso medio de la línea de costa por transporte longitudinal de sedimento.

Retroceso medio de la costa por transporte longitudinal (m)	15 cm año horizonte 2050	40 y 100 cm año horizonte 2100	m/año
Península del Fangar	-348.30	-753.29	-8.10
Playa de la Marquesa	10.24	22.14	0.24
Playa de Riumar y Cap Tortosa	194.42	420.48	4.52
Playa del Serrallo y Playa Migjorn	-120.81	-261.28	-2.81
Playa dels Eucaliptus	-76.97	-166.48	-1.79
Playa el Trabucador	7.18	15.53	0.17
Salines de la Trinitat	148.32	320.79	3.45
Punta de la Banyà	-252.83	-546.82	-5.88

Figura 2.27: (Fuente: GENCAT, 2008)

Posteriormente, estudia la evolución de la línea de costa por ascenso del nivel medio del mar, con las siguientes consideraciones:

- Con el nuevo nivel del mar se establecerá un perfil de equilibrio con forma idéntica a la existente antes del ascenso del nivel del mar
- La forma del perfil de equilibrio está determinada por la formulación de Dean (1977), la profundidad de cierre de la playa es la correspondiente a la dada por la formulación de Birkemeier (1985).
- El volumen de arena de la playa se conserva.

El resultado lo muestran en una tabla (Figura 2.28).

Tabla 6.1.2. Retroceso medio de la línea de costa por aumento del nivel del mar.

Retroceso medio de la costa por aumento del nivel medio del mar (m)	15 cm año horizonte 2050	40 cm año horizonte 2100	100 cm año horizonte 2100
Península del Fangar	8.90	23.72	59.31
Platja de la Marquesa	10.25	27.33	68.33
Platja de Riumar i Cap Tortosa	10.15	27.06	67.65
Platja del Serrallo y Platja Migjorn	9.70	25.85	64.64
Platja dels Eucaliptus	9.05	24.12	60.30
Platja el Trabucador	9.12	24.32	60.79
Salines de la Trinitat	9.34	24.90	62.25
Punta de la Banyà	7.85	20.93	52.32

Figura 2.28: (Fuente: GENCAT, 2008)

La suma de ambos cambios, por transporte y por subida del nivel del mar, también los muestra en una tabla (Figura 2.29); donde se observa que con estas previsiones se irá produciendo un “achatación” del Delta.

Tabla 6.1.3. Retroceso medio total de la línea de costa, por tramos.

Retroceso medio total de la costa (m)	Escenario A año horizonte 2050 (0.15 m)	Escenario B año horizonte 2100 (0.40 m)	Escenario C año horizonte 2100 (1.00 m)
Península del Fangar	-339.40	-729.57	-693.98
Platja de la Marquesa	20.49	49.47	90.47
Platja de Riumar y Cap Tortosa	204.56	447.54	488.13
Platja del Serrallo y Platja Migjorn	-111.11	-235.43	-196.64
Platja dels Eucaliptus	-67.93	-142.36	-106.18
Platja el Trabucador	16.30	39.84	76.32
Salines de la Trinitat	157.66	345.70	383.05
Punta de la Banya	-244.98	-525.90	-494.50

Figura 2.29: (Fuente: GENCAT, 2008)

Finalmente, exponen una serie de gráficas con las previsibles evoluciones de la línea de costa en diferentes escenarios futuros debido a la subida del nivel del mar (Figuras 2.30 a 2.35)

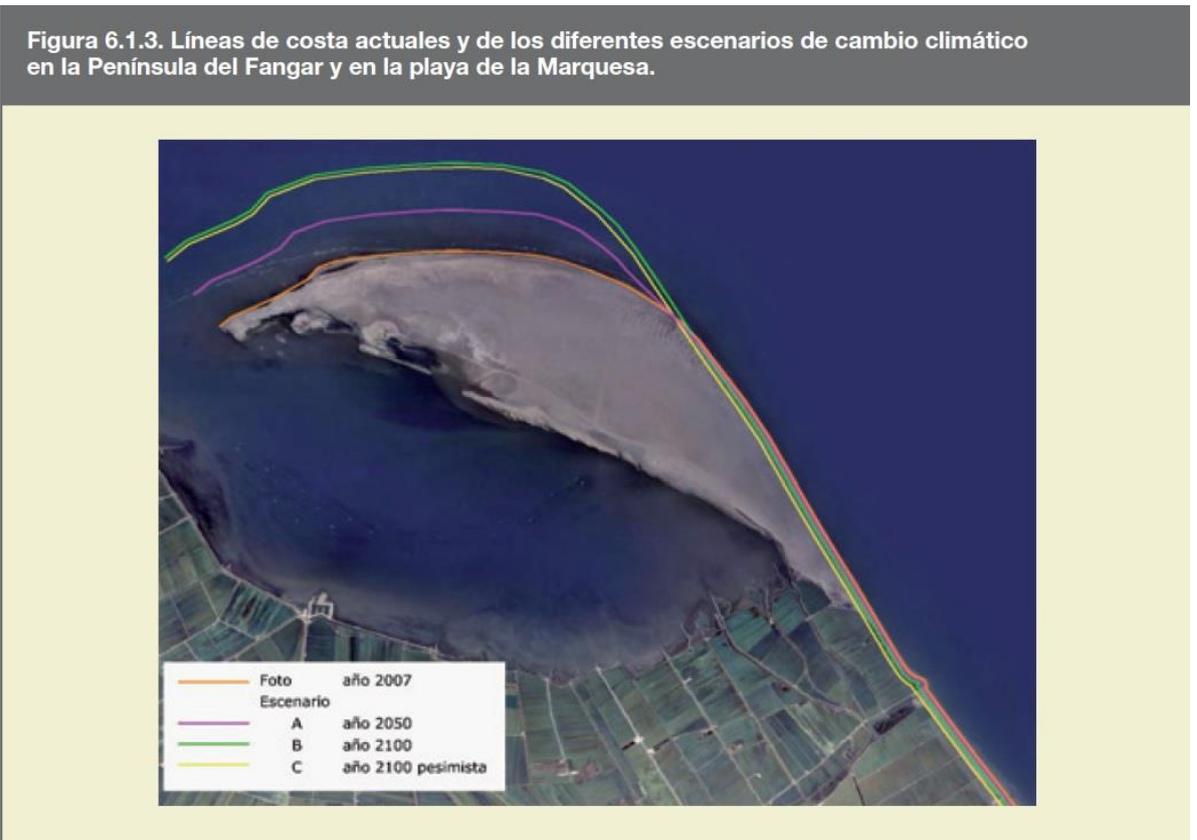


Figura 2.30: (Fuente: GENCAT, 2008)

Figura 6.1.4. Líneas de costa actuales y de los diferentes escenarios de cambio climático en la playa de Riumar y en Cap Tortosa.



Figura 2.31: (Fuente: GENCAT, 2008)

Figura 6.1.5. Líneas de costa actuales y de los diferentes escenarios de cambio climático en las playas d'Eucaliptus, Migjorn y Serrallo.



Figura 2.32: (Fuente: GENCAT, 2008)

Figura 6.1.6. Líneas de costa actuales y de los diferentes escenarios de cambio climático en la playa del Trabucador.



Figura 2.33: (Fuente: GENCAT, 2008)

Figura 6.1.7. Líneas de costa actuales y de los diferentes escenarios de cambio climático en las salinas de la Trinitat y en la Punta de la Banya.



Figura 2.34: (Fuente: GENCAT, 2008)

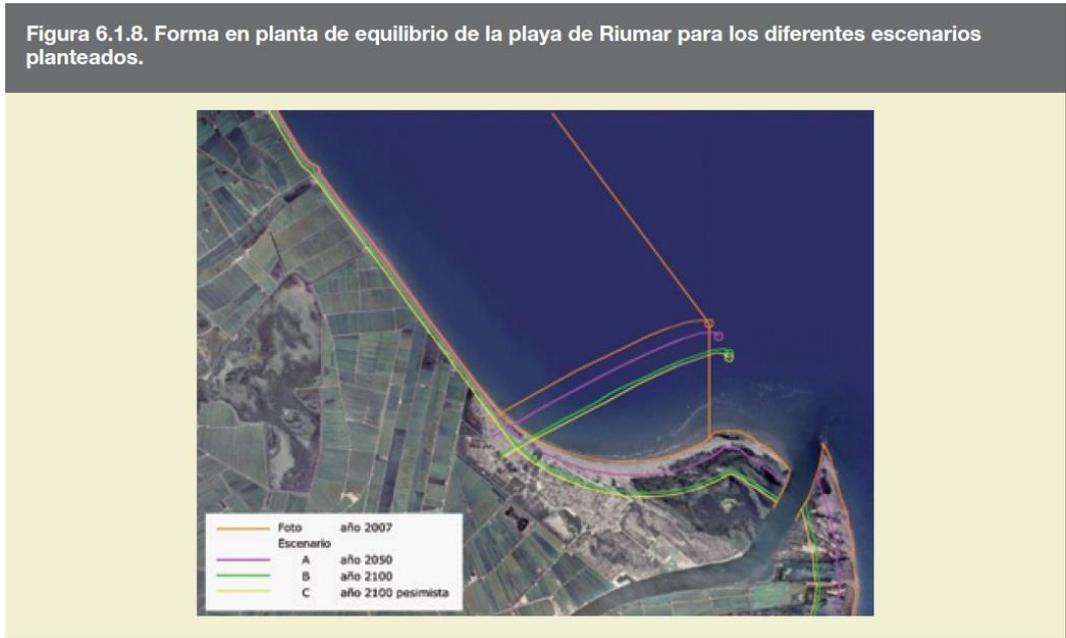


Figura 2.35 (Fuente: GENCAT, 2008)

El último de los pasos para ver la evolución de la costa del Delta es analizar las bahías del Fangar y los Alfaques. No aplican un modelo dinámico de evolución, sino simplemente estudian la inundación que se produce en diferentes escenarios de subida del nivel del mar: 0,15 m en 2050; y dos escenarios en 2100, de 0,4m (A) y 1 m (B); y consideran una subsidencia de 0,2 cm/año. Estos escenarios se muestran en las Figuras 2.36 a 2.38.

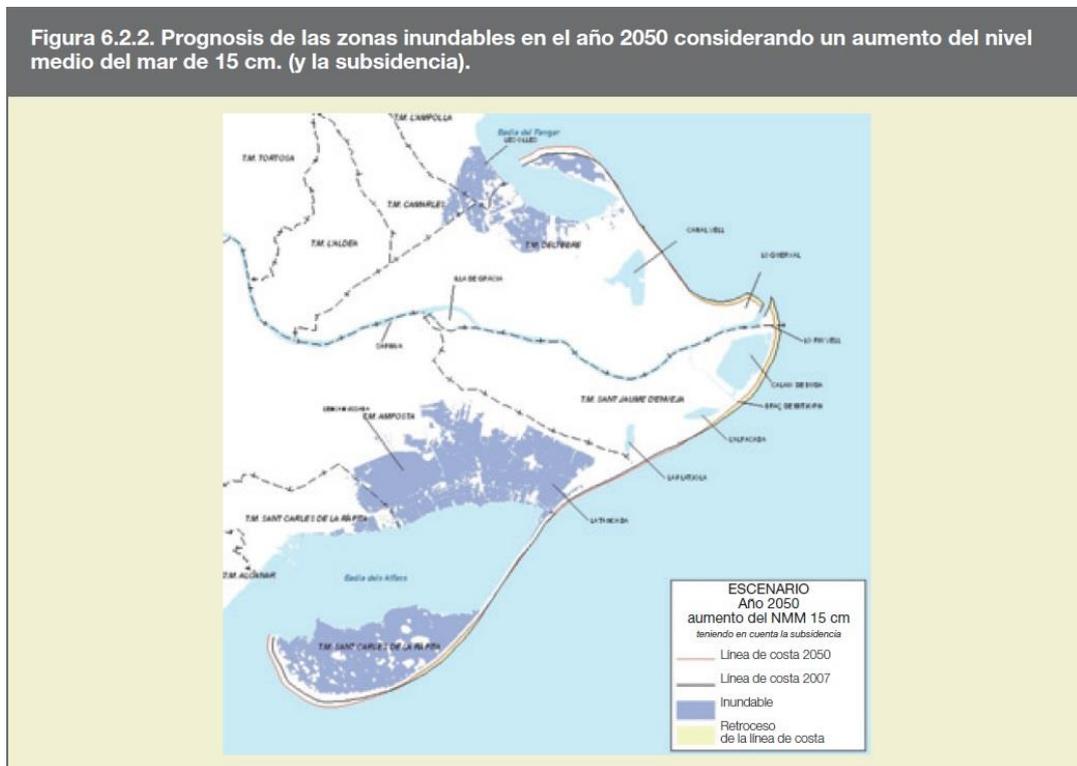


Figura 2.36: (Fuente: GENCAT, 2008)

Figura 6.2.3. Prognosis de las zonas inundables en el año 2100 considerando un aumento del nivel medio del mar de 40 cm. (y la subsidencia).

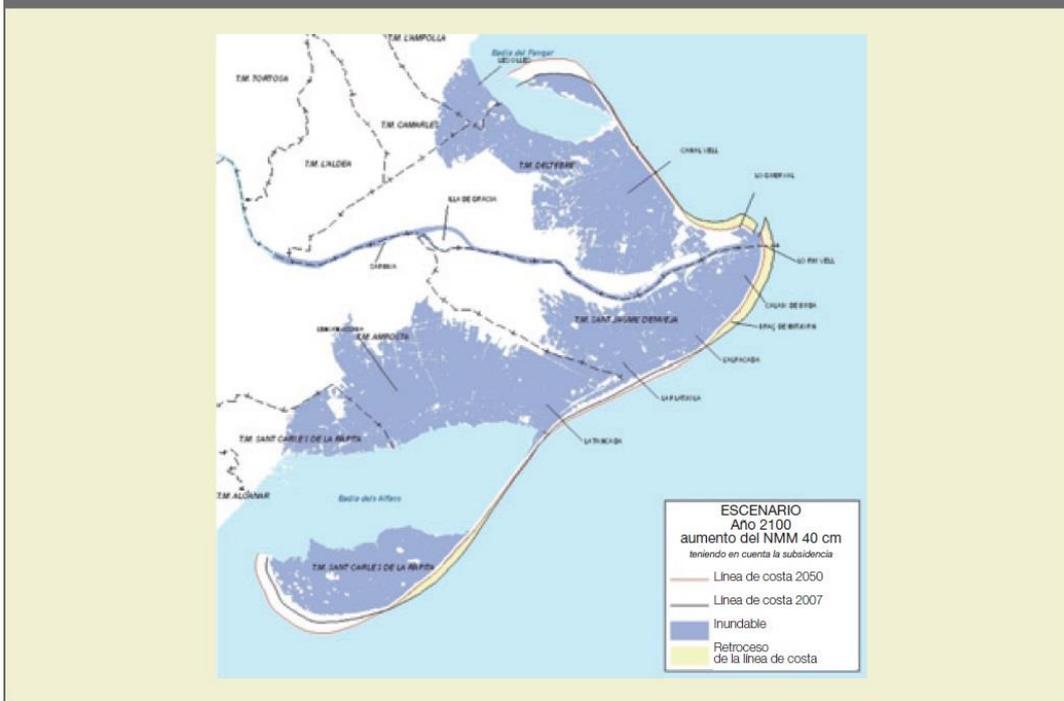


Figura 2.37: (Fuente: GENCAT, 2008)

Fig. 6.2.4. Prognosis de las zonas inundables en el año 2100 considerando un aumento del nivel medio del mar de 100 cm. (y la subsidencia).

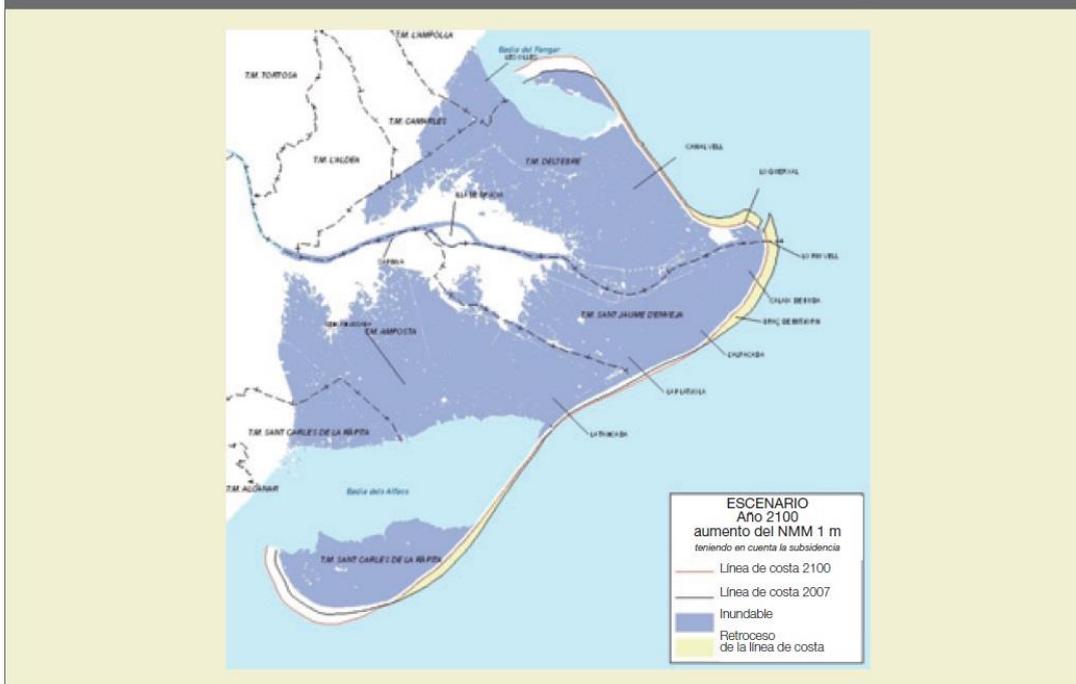


Figura 2.38: (Fuente: GENCAT, 2008)

A continuación analizan la penetración salina sobre el río (falca salina) que lo hacen suponiendo: La situación actual de la falca; la influencia de la reducción de caudales en el río Ebro; y la influencia del aumento del nivel del mar.

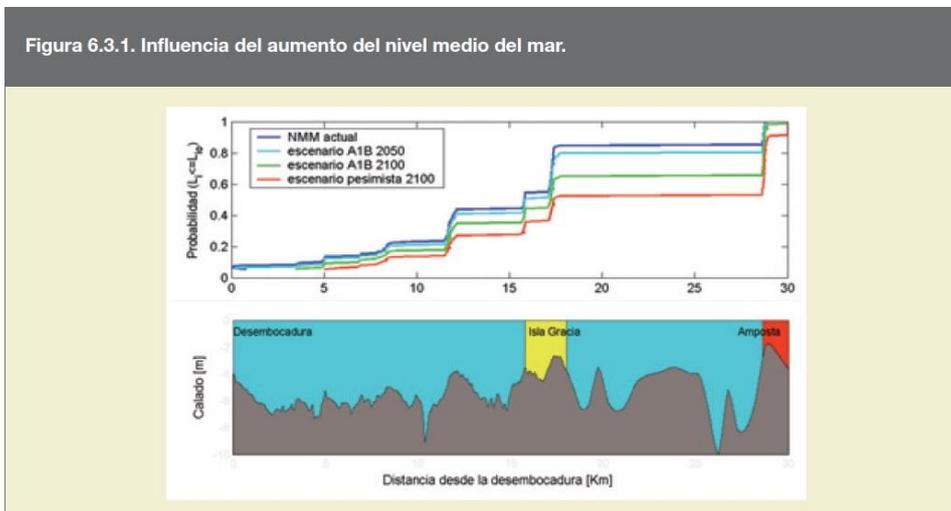


Figura 2.39 (Fuente: GENCAT, 2008)

Si bien, los resultado dado por este trabajo, no parece que tenga en cuenta el escenario contemplado por la propia inundación (Figuras 2.36 a 2.38).

Finalmente, se hace un “Análisis de riesgo sobre bienes económicos, naturales y sociales” y aunque se hable de zonas de riesgo y categoricen estos (Figura 2.40) no parece ésta la palabra adecuada, con el escenario expuesto en la Figura 2.39.

Ámbito	Riesgos previstos en un horizonte de 50 años	Riesgos previstos en un horizonte de 100 años
Zona de la Playa de la Marquesa-Nen Perdut	Reducción de la playa y traslado de ésta hacia atrás	Reducción de la playa. Afectación indirecta de la plana deltaica desde las bahías
Zona Riumar	Afección a la urbanización por subida de la cota del nivel del mar	Incremento de la afectación. Afectación indirecta de la plana deltaica desde las bahías
Zona Garxal - Isla Sant Antoni - Isla de Buda- Alfacada	Reducción de espacios naturales	Incremento de la afectación. Afectación indirecta de la plana deltaica desde las bahías
Platjola - Eucaliptus	No se prevé afectación	Afectación indirecta por inundación de la plana deltaica desde las bahías. (afectación a la urbanización)
Punta Fangar y Punta de la Banyà y barra Trabucador	Evolución de los sistemas de acuerdo con la dinámica costera. Reducción del interior de la Punta de la Banyà o de la Punta del Fangar, a la vez que crecen en longitud	Siguen los procesos evolutivos de la línea de costa. Las puntas se alargan más, y las partes internas quedan más inundadas sin desaparecer
Hemidelta Norte	Inundación en el Hemidelta a partir primero de las golas de Les Olles y de la estación de bombeo del Port de l'illa. Después, a partir de otros puntos bajos	Inundación desde el resto del Hemidelta hacia la punta con probabilidades diferentes según el escenario
Hemidelta sur	Inundación en el Hemidelta sur a partir primero de las golas. Riesgo sobre la población de Poble nou del Delta	Inundación desde el resto del Hemidelta hacia la punta con probabilidades diferentes según el escenario

Figura 2.40 (Fuente: GENCAT, 2008)

A continuación se van analizando los diferentes riesgos: Sobre bienes naturales, económicos y sociales.

El último de los capítulos los dedica al “Diseño de medidas de adaptación y prevención” y siguen cuatro grandes líneas de medidas:

- Medidas de gestión, planificación y normativa
- Medidas para la obtención y gestión de datos, y elaboración de estudios
- Medidas para la información y sensibilización ciudadana
- Medidas de intervención directa (Tabla 8.4)

Las grandes líneas estratégicas de la línea de costa, consideran las que se recoge en el proyecto EUROSION (Guide to coastal erosion management practices in Europe, 2004), donde se especifica en qué circunstancias se consideran más convenientes, y en qué lugares de Europa se están utilizando (Figura 2.41).

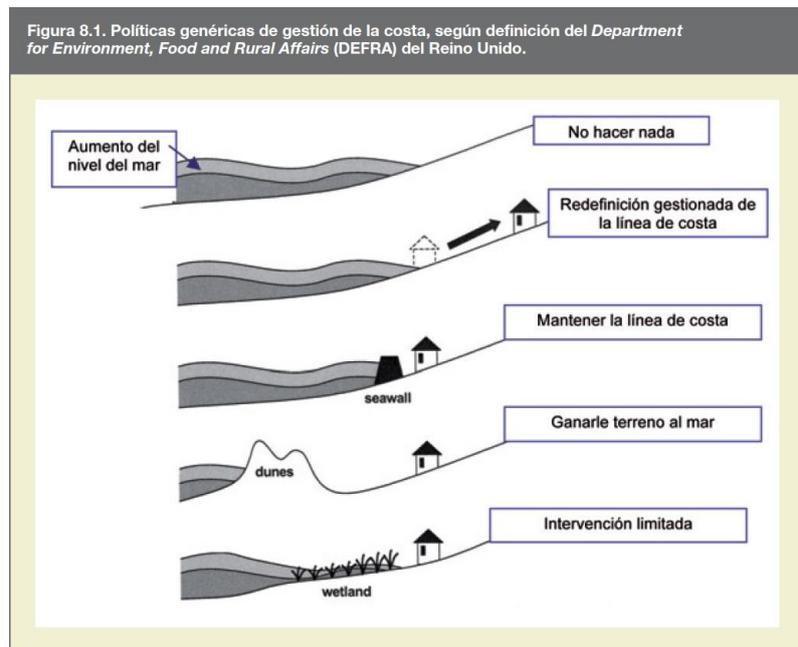


Figura 2.41 (Fuente: GENCAT, 2008)

E indica respecto a las medidas directas sobre la franja litoral: “El resto de medidas están dirigidas a tratar de minimizar la subida del nivel del mar en base a dos estrategias: la redefinición gestionada de la línea de costa y el mantenimiento de la línea de costa mediante diferentes técnicas. En este sentido, se debe mencionar que algunas de las actuaciones propuestas por la D.G. de Sostenibilidad de la Costa y del Mar del Ministerio de Medio Ambiente pueden tener repercusiones positivas por lo que respecta a los efectos del cambio climático por subida del nivel del mar, dado que consisten en caminos de ronda que actúan como motas de protección”.

2.1.4 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión de la desembocadura y cauce inferior del río en el delta del Ebro (Tarragona)” (Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria -IHAC- Universidad de Cantabria, julio de 2011)

El documento está formado por seis capítulos, con anejos de cálculo. En el primero de ellos “Introducción”, muestra la zona de estudio, esboza los problemas existentes en ella, los objetivos marcados en el trabajo y los precedentes de éste, e indica que para la realización del presente documento se ha contado con la siguiente información:

- Estudio sobre previsión de los efectos del Cambio Climático en el Delta del Ebro y Medidas de Adaptación y Prevención. IH Cantabria (Universidad de Cantabria). 2009.
- Plan Director para la Gestión Sostenible de la Costa. Demarcación Hidrográfica del Ebro. Anejo 2: Estudio de Dinámicas. Taller de Ingeniería Ambiental S.L. 2007

En el siguiente capítulo 2 se especifican las bases de datos empleadas para el análisis de la dinámica litoral (oleaje, mareas y dinámica fluvial). El capítulo 3 tiene dos apartados importantes: El referente al clima marítimo, y el dedicado al transporte sólido litoral. El transporte longitudinal de sedimento lo calculan teóricamente mediante la fórmula del CERC (Figura 2.42).



Figura 2.42: Cálculo teórico del transporte longitudinal de sedimentos a lo largo del Delta usando la fórmula del CERC (Fuente: IHAC, 2011)

Y concluyen diciendo: “A grandes rasgos la tendencia del delta es a erosionarse en su parte central (Cap Tortosa) y a crecer en los dos lóbulos laterales (La península del Fangar y la Punta de la Banya), mientras que las zonas intermedias funcionan como zonas de transición de sedimentos” (Figura 2.43).



Figura 2.43: Zonas de erosión y depósito a lo largo del Delta (Fuente: IHAC, 2011)

El siguiente capítulo 4, “Morfodinámica de la desembocadura y cauce inferior del Ebro” hace un análisis bastante exhaustivo de la evolución histórica de la desembocadura. Primeramente hace una breve descripción de la evolución que se ha producido en la desembocadura mediante cartas náuticas que nos remontan hasta el siglo XVIII (Figura 2.44).

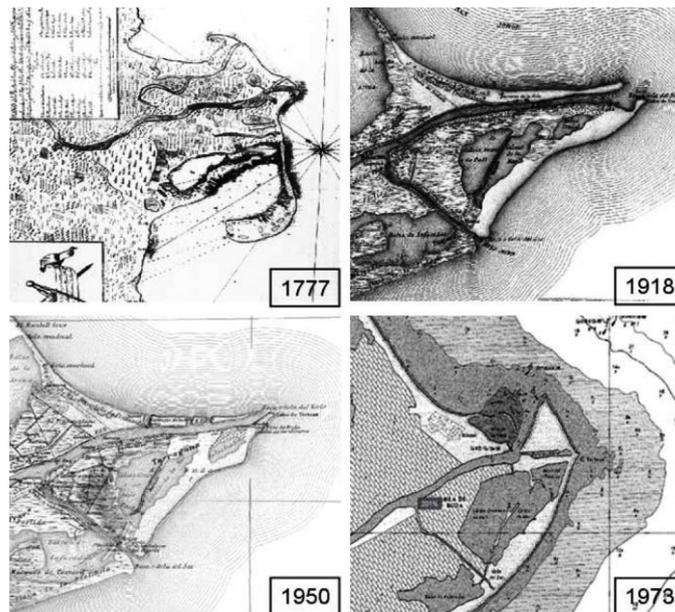


Figura 2.44: Evolución histórica de la desembocadura del Ebro (Fuente: IHAC, 2011)

Para el análisis actual de la evolución de la desembocadura parten de la fotografía aérea más antigua que toman de la Jefatura de Costas de Tarragona, correspondiente al año 1937 (Figura 2.45) que es cuando se cierra la salida del Cabo Tortosa y se abre, o más bien se ensancha, la salida norte actual y lo comparan con 2009 (Figura 2.46).



Figura 2.45: Foto de 1937 de la desembocadura del Ebro una vez cerrada la desembocadura del Cabo Tortosa (Fuente: Jefatura de Costas de Tarragona e IHAC, 2011)



Figura 2.46: Comparación de la desembocadura en 1937 (naranja) sobre la fotografía aérea de 2009 (Fuente: IHAC, 2011)

A continuación se va analizando año tras año las transformaciones que se van produciendo en esta desembocadura, utilizando para ello diversos vuelos fotogramétricos y comparándolos con los del año 2009. El resultado final lo resumen en la Figura 2.47.

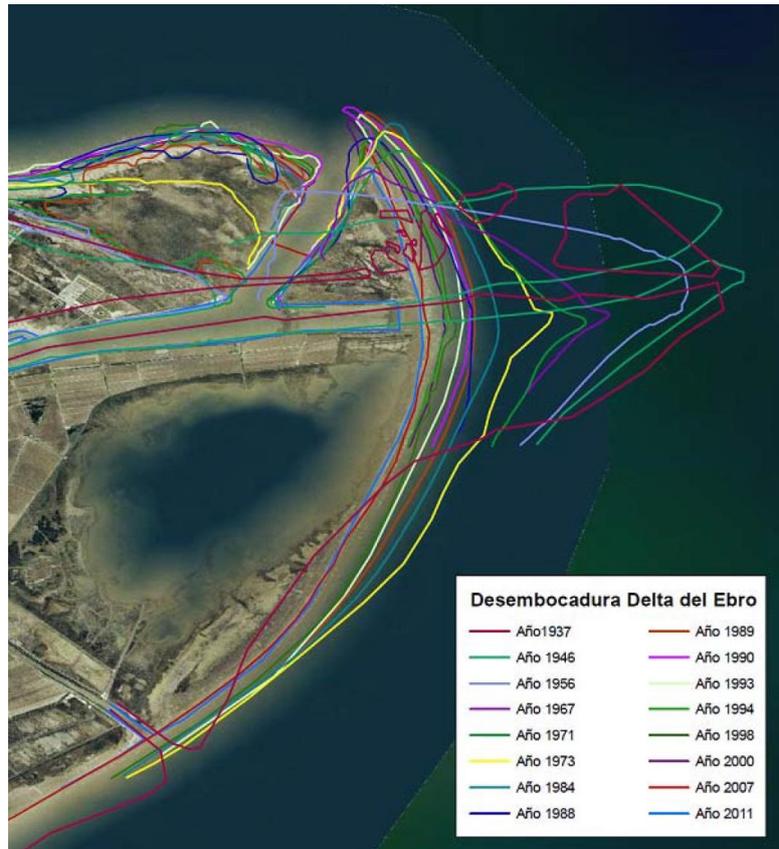


Figura 2.47: Comparación de la desembocadura desde 1937 hasta 2011, sobre la fotografía aérea de 2009 (Fuente: IHAC, 2011)

La tasa de evolución que estudian de la salida, gola, norte se muestra en la Figura 2.48, donde se aprecia que hasta comienzos de los años 80 del pasado siglo iba en aumento, pero desde entonces ha ido retrocediendo hacia tierra. Esa misma evaluación lo hace para el Cabo Tortosa (Figura 2.49).

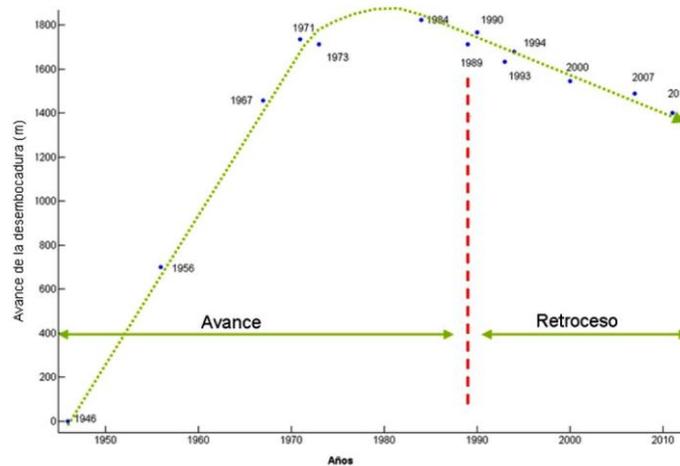


Figura 2.48: Movimiento de la desembocadura norte del Ebro desde el año 1946 (Fuente: IHAC, 2011)

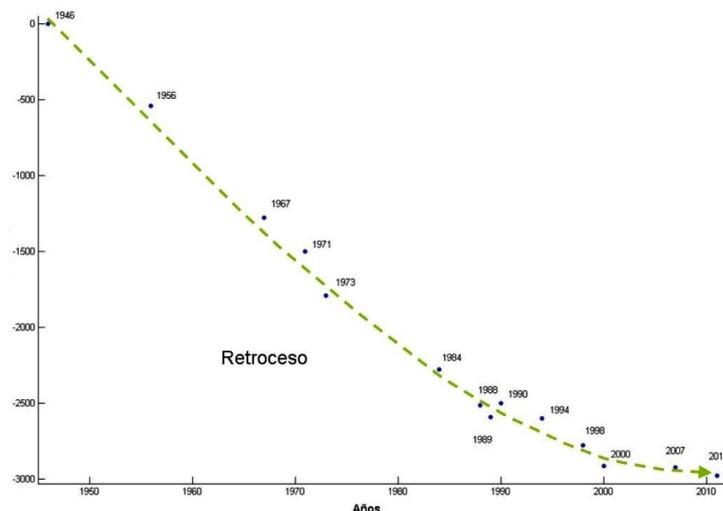


Figura 2.49: Movimiento del Cabo Tortosa desde el año 1946 (Fuente: IHAC, 2011)

Para analizar la evolución futura de la costa de la desembocadura utilizan dos hipótesis:

- Hipótesis 1: La extrapolación se realiza asumiendo que el comportamiento de la línea de costa se mantiene constante, es decir, se produce un retroceso lineal.
- Hipótesis 2: La extrapolación se realiza asumiendo que el sistema se acerca a una posición de equilibrio. A medida que transcurre el tiempo la tasa de modificación va disminuyendo.

Con ambas, extrapolan las curvas anteriores (Figuras 2.50 y 2.51)

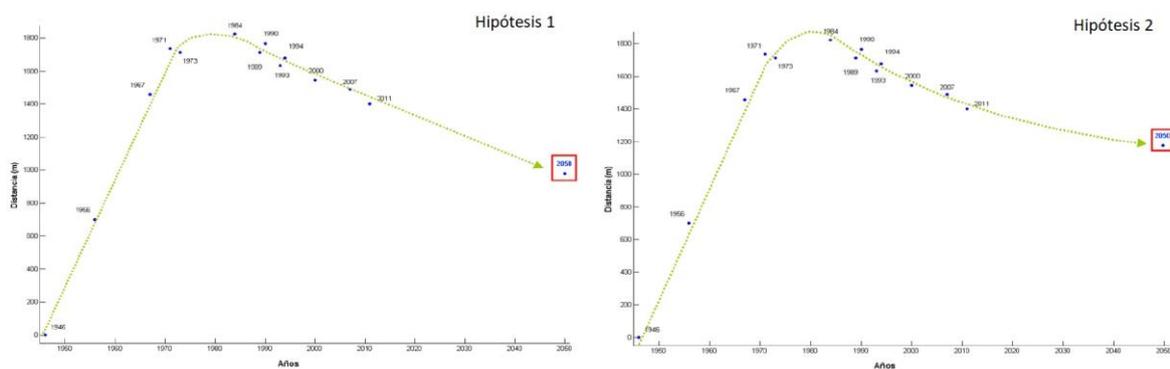


Figura 2.50: Movimiento futuro de la desembocadura norte del Ebro desde el año 1946 en las dos hipótesis (Fuente: IHAC, 2011)

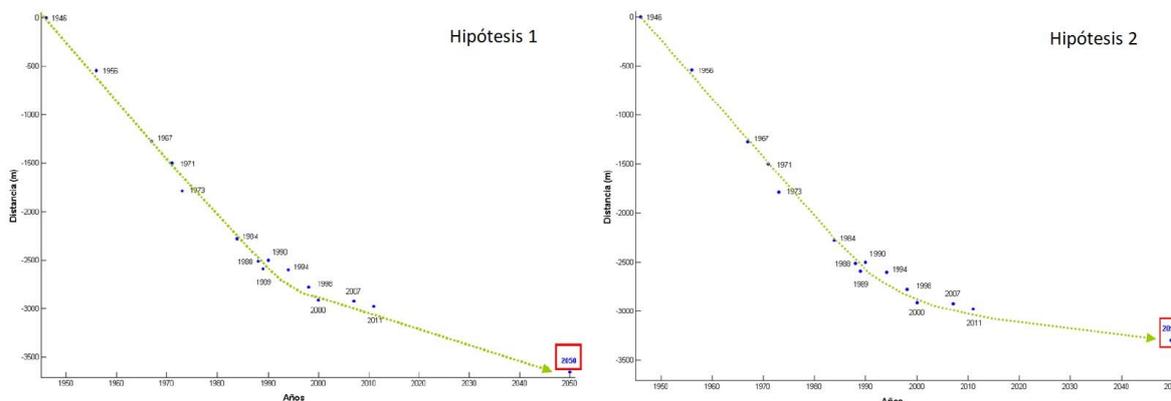


Figura 2.51: Movimiento futuro del Cabo Tortosa desde el año 1946 en las dos hipótesis (Fuente: IHAC, 2011)

Finalmente, aplicando la Regla de Bruun, determinan el retroceso medio que sufriría la costa en la desembocadura del Río Ebro para un aumento del nivel del mar debido al cambio climático de 15 cm hasta el año 2050, resultando un valor medio de 10,15 m.

Finalmente, las conclusiones a las que llegan son las siguientes:

1. Los grandes cambios morfodinámicos que experimentará el delta del Ebro a largo plazo están asociados a la propia evolución del sistema, como consecuencia de la adaptación del mismo a unas nuevas condiciones hidrodinámicas. Dicha adaptación provoca la erosión en la zona de Cap Tortosa y en la zona de Punta Galatxo.
2. Asumiendo que la tendencia erosiva se mantiene de manera lineal a lo largo del tiempo, se estima que la tasa de retroceso que experimenta Cap Tortosa es de 10,9 m/año, mientras que la zona de Punta Galatxo experimenta un retroceso de 17,4m/año.
3. Por otro lado, si se asume que el sistema se acerca a una posición de equilibrio, la tendencia de a largo plazo se estabiliza. Esta tendencia de estabilización provoca que la tasa de erosiva tienda a un valor constante va disminuyendo. se estima que la tasa de retroceso que experimenta Cap Tortosa es de 4,6 m/año, mientras que la zona de Punta Galatxo experimenta un retroceso de 9,2 m/año.
4. La influencia del aumento del nivel del mar sobre la evolución a largo plazo del Delta del Ebro es de que se produzca un retranqueo de la línea de costa del orden de 10,15 m.

2.1.5 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero del Delta del Ebro” (LIM, 2011)

El estudio está estructurado en diez capítulos, al que acompañan las referencias y anejos. El primero de ellos es introductorio. El segundo trata de los datos y método de análisis de la evolución costera. El tercer capítulo está dedicado a la evolución que se había producido en las costas del Delta, que dividen en dos partes: Hemidelta Norte y hemidelta sur; con ellos actualizan los datos que habían presentado en el trabajo de 1999-2000, llevándolos hasta el año 2009.

2.1.5.1 Evolución costera

El informe sobre la evolución es muy completo y exhaustivo, se tomaron puntos de control con un espaciado de 150 m a lo largo de la línea de orilla en el hemidelta norte (zonas Z1, Z2 y Z3) y de 200 m en el hemidelta sur (zonas Z4, Z5, Z6 y Z7), Figura 2.52.

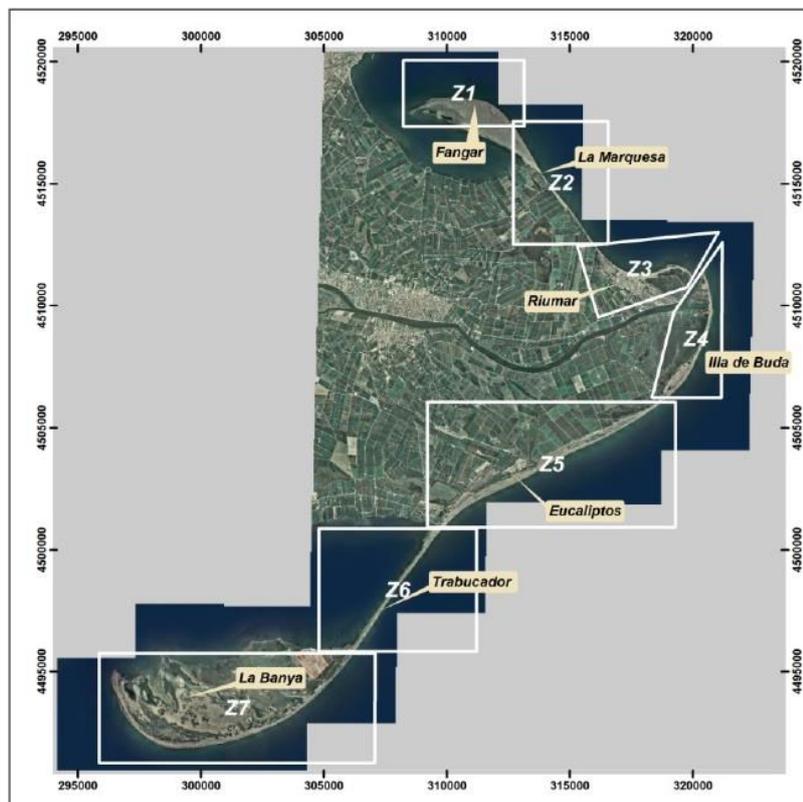


Figura 2.52: Zonificación de la costa del Delta del Ebro (Fuente: LIM, 2011)

Del hemidelta norte, dice:

“Los desplazamientos sufridos por la línea de orilla durante la totalidad del período de seguimiento (1957-2009) en el hemidelta Norte se muestra en la tabla 3.1 y en la figura 3.6. Como puede verse, la línea de orilla a lo largo del hemidelta Norte se caracteriza por presentar un comportamiento erosivo generalizado a lo largo de todo el frente, mostrando un avance de la línea de orilla sólo los extremos Norte y Sur (figura 3.6). Así, la parte central del hemidelta (Playa de la Marquesa) experimenta un retroceso medio de unos 270 m desde 1957 a 2009. En la zona más al Norte (perfiles 1 a 21) el avance de la línea de orilla se verifica en la zona donde la costa cambia de orientación en la Punta del Fangar y que se traduce en un avance de la flecha hacia la costa tendiendo a cerrar la Bahía, con un avance máximo de unos 1.3 km en el ápice de la flecha (perfil 1)”.

En la Figura 2.53 se muestra el plano de evolución de las diferentes líneas de costa del Hemidelta Norte desde 1957 hasta 2009.

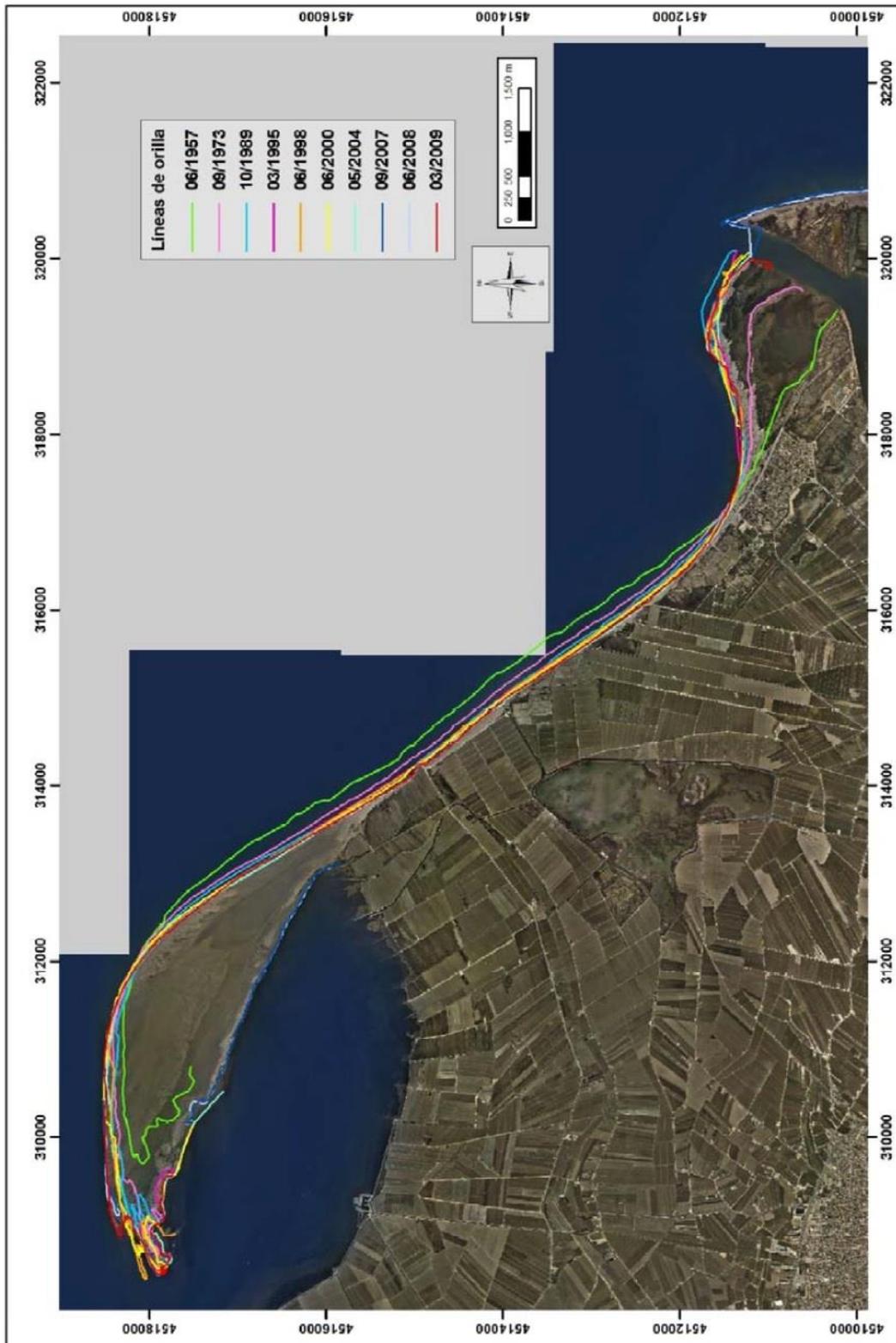


Figura 2.53: Evolución de la costa de la zona norte del Delta del Ebro desde 1957 a 2009 sobre la ortofotografía de 2009 (Fuente: LIM, 2011)



Para la zona del hemidelta sur, el informe indica que la forma evolutiva que se observa es la alternancia de tramos erosivos con tramos acumulativos: En ella, el máximo retroceso observado se da en la Illa de Buda (Zona 4) con un retroceso medio máximo de la línea de costa, entre 1957 y 2009, de 1900 m coincidiendo con la antigua desembocadura del Río, Cabo Tortosa.

Continuando hacia el sur (Zona 5), existen zonas erosivas y acumulativas, Eucaliptos, con un avance de la línea de orilla de unos 360 m en el periodo analizado, entre 1957 y 2009 (Figura 2.54). La zona más al sur (Zona 6) lo forma la playa del Trabucador que tiene un retroceso generalizado, pero variable, creciendo a medida que va hacia el sur: El retroceso medio, en el periodo indicado, fue de 180 m, con un máximo de 290 m (Figura 2.55).

En la siguiente zona (Zona 7), se comporta como una costa acumulativa siendo el avance en la punta sur del óvalo; pero no con tendencia a cerrar la bahía de los Alfaques ya que el crecimiento es paralelo a la costa interior. El avance máximo medio es de 870 m.

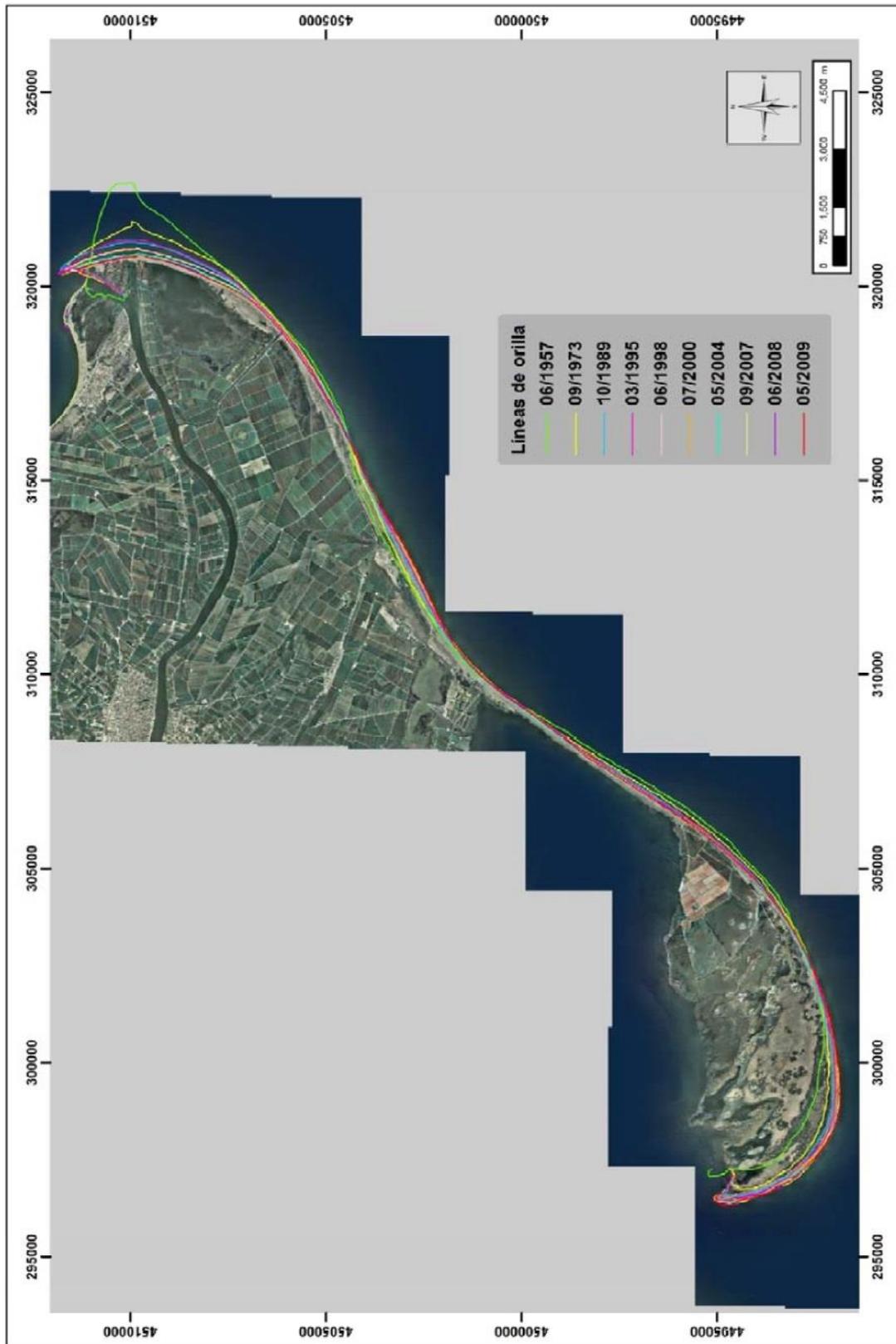


Figura 2.54: Evolución de la costa de la zona norte del Delta del Ebro desde 1957 a 2009 sobre la ortofotografía de 2009 (Fuente: LIM, 2011)

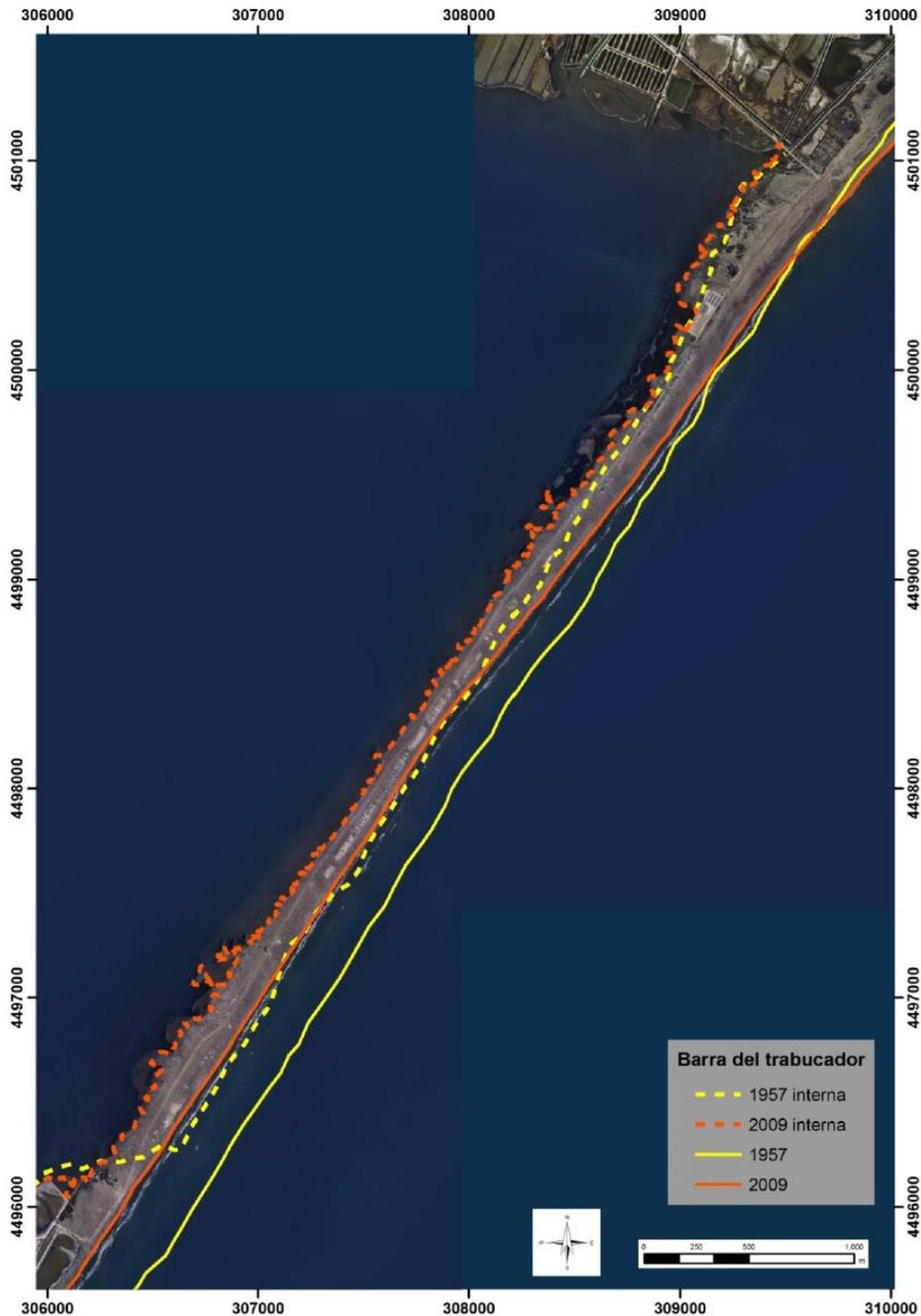


Figura 2.55: Evolución de la barra del Trabucador entre 1957 y 2009 sobre la ortoimagen de 2009 (Fuente: LIM, 2011)

A continuación hace un exhaustivo estudio de las tasas evolutivas de todos los perfiles tomados en este hemidelta sur. Y finaliza diciendo:



“Al igual que ocurría en la parte norte, la línea de orilla del hemidelta Sur presenta un comportamiento erosivo generalizado durante el período 2000/2004 con tasas de retroceso mayores que las calculadas durante cualquier período analizado a largo plazo, con la excepción de las registradas en Cap Tortosa durante el período 1957/73 (zona Z4).

Este comportamiento impulsivo como respuesta a la presencia de años energéticamente altos se relaja una vez las condiciones energéticas del oleaje incidente disminuyen, de tal forma que el comportamiento durante el período post tormenta (2004/2009) se caracteriza por un avance de la línea de costa con respecto a la que quedó tras la acción de los temporales, reflejando la acción de los procesos recuperadores. Independientemente de ello, la recuperación (tasas de avance de la línea de orilla) es inferior en magnitud a la erosión durante el período de temporal (tasas de retroceso) con la excepción de aquellas zonas que de por sí se comportan de forma acumulativa (Eucaliptos y La Banyà)”.

Resulta muy interesante el estudio de los desplazamientos experimentados por la costa exterior e interior a lo largo del Trabucador entre 1957 y 2009 que los muestra en la Figura 2.55. E indica:

“La disminución máxima del ancho observada ha sido de unos 100 m de tal forma que el ancho mínimo actual del Trabucador se sitúa entre los 125 a 150 m que podría considerarse como el ancho de playa crítico a partir del cual siempre que exista arena suficiente, el oleaje reconstruiría la playa en su parte trasera mediante los procesos asociados al rebase”.

2.1.5.2 Balance sedimentario

El siguiente capítulo 4 se dedica a hacer el “Balance sedimentario” del Delta. Su método de cálculo se basa en la evolución de la costa: Se determina la superficie ganada o perdida en un tramo y se multiplica por la profundidad de cierre más la altura de la berma. La utilizada es la extremal, periodo de retorno de 50 años, y la fórmula de Hallermeier (1981), aunque comparan con la de Birkermeier (1985). Al final el valor tomado es de 9,5 m.

El cálculo del balance sedimentario se hace en dos escalas de tiempo:

1. A medio plazo (varios años): que será evaluado utilizando las tasas de evolución actuales y la profundidad de cierre a medio plazo ($d_c = 5,4$ m).
2. A largo plazo (varias décadas): que será evaluado utilizando las tasas de evolución durante diferentes períodos de tiempo y la profundidad de cierre a largo plazo ($d_c = 9,5$ m).

E indica (Figura 2.56): “el balance sedimentario del Delta del Ebro a largo plazo es claramente erosivo, incrementándose el volumen de sedimento erosionado de la cara externa del delta a medida que transcurre el tiempo, pasando de una cantidad próxima al equilibrio durante el período 1957/73 (una pérdida de unos 26.000 m³/año) a una pérdida de unos 700.000 m³/año durante los últimos 20 años. En condiciones actuales, a una escala de medio plazo la tasa de pérdida de volumen estimada es de unos 430.000 m³/año”.

El resumen gráfico de este balance sedimentario lo muestran en Figuras 2.57 a 2.60.



ZONAS	1957-73	1973-89	1989-09	1989-09 actual
Z1	432425	-8442	216675	136642
Z2	-696886	-571303	-309682	-195295
Z3	460506	302206	-23718	-14957
TOTAL HN	196045	-73493	-116725	-73610
Z4	-978868	-628272	-829699	-511777
Z5	243115	196838	149425	92169
Z6	-350682	-196227	-215081	-132667
Z7	864710	216675	313671	193479
TOTAL HS	-221725	-410987	-581684	-358796
TOTAL	-25,680	-484,480	-698,409	-432,406

Figura 2.56: Tabla del balance sedimentario, tasas de cambio de volumen ($m^3/año$), calculada a partir de la evolución de línea de orilla para diferentes períodos y diferentes zonas a lo largo del Delta del Ebro (Fuente: LIM, 2011)

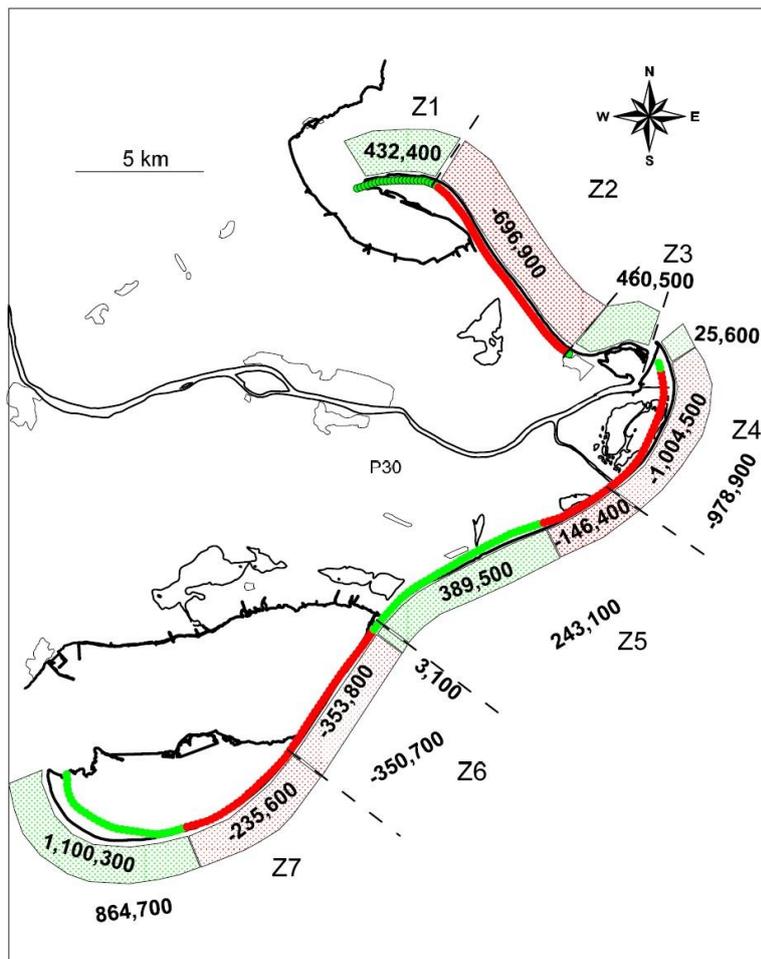


Figura 2.57: Balance sedimentario a largo plazo, periodo 1957-1973 (Fuente: LIM, 2011)

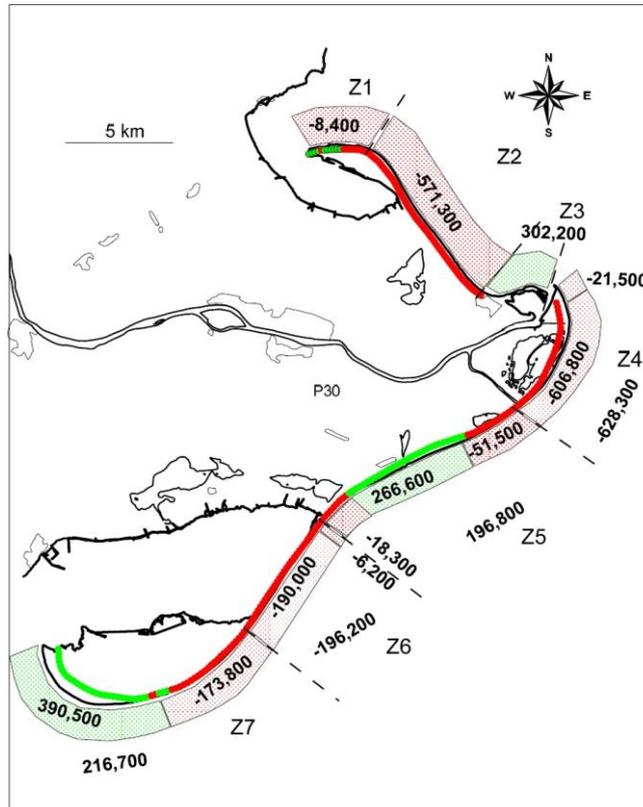


Figura 2.58: Balance sedimentario a largo plazo, periodo 1973-1989 (Fuente: LIM, 2011)

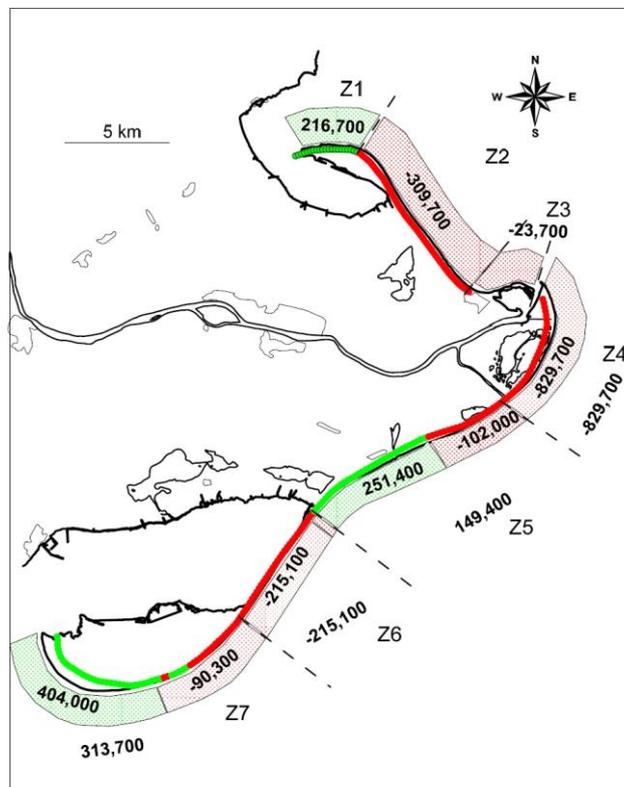


Figura 2.59: Balance sedimentario a largo plazo, periodo 1989-2009 (Fuente: LIM, 2011)

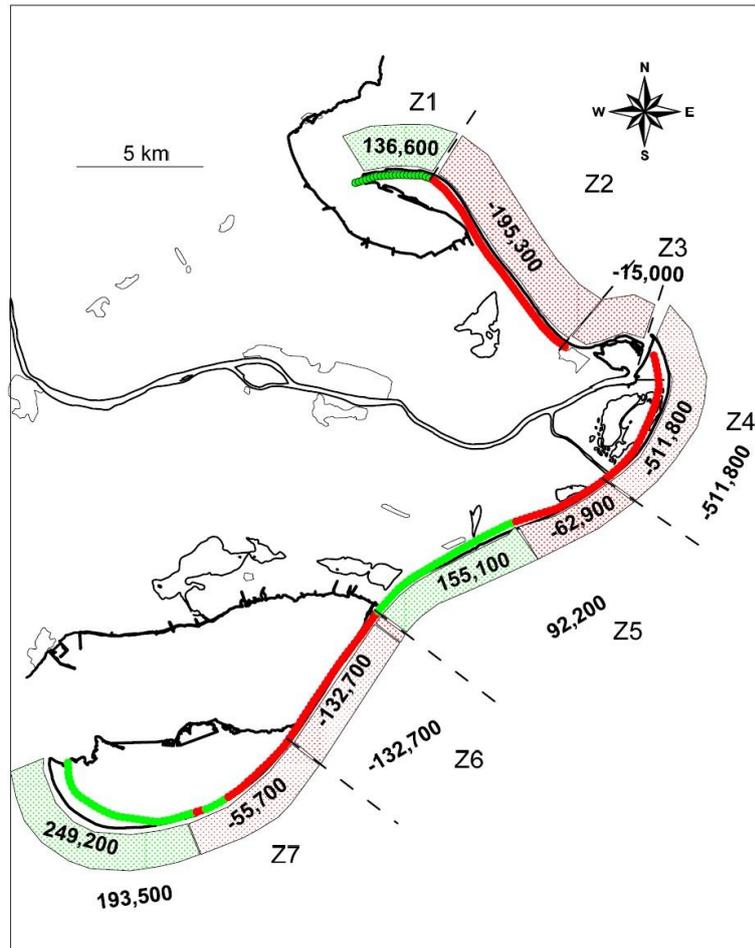


Figura 2.60: Balance sedimentario a medio plazo, periodo 1989-2009 (Fuente: LIM, 2011)

Con esas tasas de balance sedimentario, determinan el transporte de sedimentos que ha sido capaz de realizar estas transformaciones a largo plazo. El resultado también lo muestran gráficamente, en cuatro figuras correspondientes a los periodos de tiempo que han tomado: 1957-1973, 1973-1989 y 1989-2009 en dos escenarios, en función de si el sedimento es capaz de cruzar o no la Illa de Sant Antoni (la Figura 2.61 muestra la condición de transporte nulo hacia el sur en la illa de Sant Antoni).

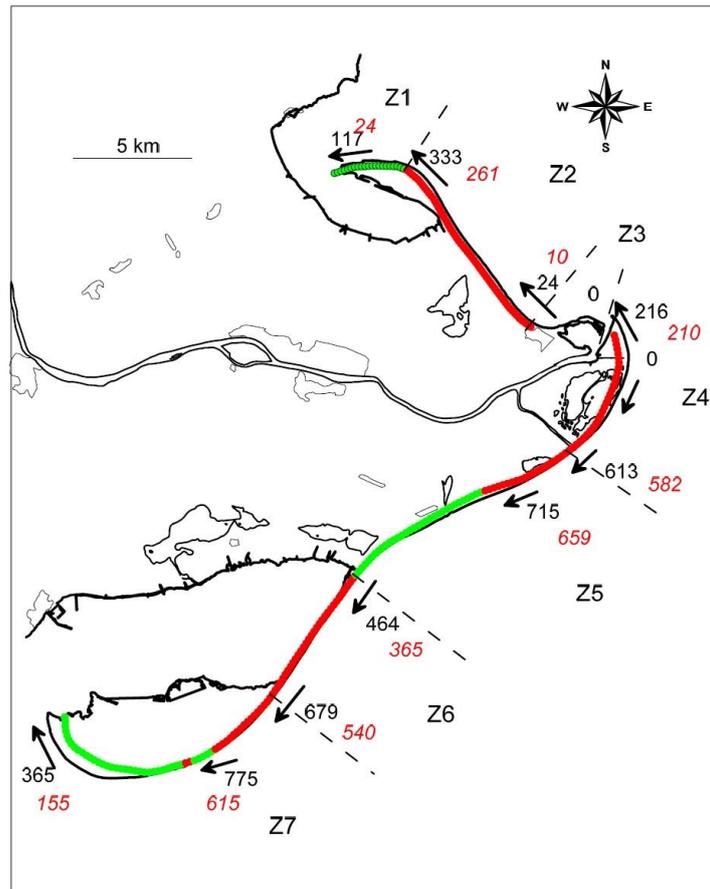


Figura 2.61: Tasas de transporte longitudinal neto ($\times 1.000 \text{ m}^3/\text{año}$) a partir del balance sedimentario a largo plazo entre 1989 y 2009. Los valores en rojo y cursiva son los correspondientes tras haber eliminado el efecto de la subida del nivel del mar. (Condición de contorno en la desembocadura de transporte nulo de material desde Sant Antoni) (Fuente: LIM, 2011)

El capítulo 5 lo dedican al estudio del “Clima de oleaje”. Para ello utilizan los datos de la boya direccional del Cabo Tortosa de GENCAT, fondeada a 60 m de profundidad frente al Delta.

2.1.5.3 Evolución futura de la línea de costa del delta

El capítulo 6 trata de la “Evolución futura de la línea de costa”, y lo hace en varios estadios: 1) Medio plazo, y 2) Con la subida del nivel del mar

Para el estudio de la evolución a medio plazo (décadas), indica que existen varios modelos, entre los que destacan dos a aplicar para conocer ésta (Hanson et al., 2003).

- Se intenta reproducir los procesos a pequeña escala e integrarlos en el tiempo: *Modelos orientados a procesos*.
- Aquellos que reproducen un comportamiento observado o esperable sin poner énfasis en los procesos responsables: *Modelos orientados al comportamiento*.



El trabajo elige el segundo de los tipos de modelos, que reproducen el comportamiento, que como dicen, simulan la evolución del sistema, suponiendo que se conoce la forma que va evolucionar, suponiendo un comportamiento similar del pasado, y la forma final que se espera, e indican: “En este contexto el medio plazo se asocia a una escala de décadas, reteniendo el efecto integrado del transporte longitudinal de sedimento a esa escala temporal. A la hora de estimar su valor se fija un horizonte temporal dado por el año 2050, es decir, dentro de unos 40 años”.

“A la hora de plantear el modelo, se utiliza para las partes más variables –recurvadas de la costa (flechas norte y sur y Cap Tortosa) diferentes perfiles tipo mientras que para las artes con un comportamiento más uniforme (e.g. Marquesa) se utilizan perfiles promedio...”

Mediante gráficas van determinando la previsible evolución de la costa para el horizonte de 2050, resumidas en una tabla 6.1 (Figura 2.62) y en tres figura (Figuras 2.63 a 2.65)

zona	perfil	LR ₇₃₋₀₉ (m/a)	ΔX ₂₀₅₀ (m)	LR ₈₉₋₀₉ (m/a)	ΔX ₂₀₅₀ (m)
Z1	1	9.4	+ 360	20.6	+ 820
	6	8.0	+ 230	12.0	+ 420
	8	4.8	+ 165	8.5	+ 340
	12	3.8	+ 155	5.1	+ 210
	16	3.2	+ 120	5.9	+ 245
	22	0 (*)	+ 9 (*)	0 (*)	+ 12 (*)
	24	-1.7	- 60	-1.8	- 60
	28	-3.6	- 145	-3.5	- 145
Z2		-3.8	-152	-3.5	-145
Z3	P82	0.9	33	1.4	56
Z3	P92	10.7	428	-3.8	-176
Z4	P169	-12.7	-468	-17.9	-706
Z4	P166	-18.4	-705	-22.4	-890
Z4	P161	-17.1	-662	-18.8	-742
Z4	P143	-2.7	-116	-3	-128
Z5	P107	7	282	6.4	256
Z6	P79	-1.4	-58	-1.7	-73
Z6	P63	-5	-190	-4.7	-180
Z7	45	-2.6	-112	-1.4	-57
	39	-0.8	-30 (*)	0.2 (*)	+15
	33	0.5(*)	+19	-0.01 (*)	-3
	26	2.4	-108	3.4	+153
	20	6.8	+275	7.1	+285
	14	9.3	+373	9.3	+373
	8	7.9	+340	7.9	+340
	3	8.7	+385	7.3	+320

Tabla 6.1. Tasas de evolución de la línea de orilla a largo plazo (LR) y predicción para el año 2050 del desplazamiento con respecto a la posición actual (ΔX) en perfiles representativos de los diferentes sectores a lo largo de la costa del Delta del Ebro (ver localización en capítulo 2). (LR₇₃₋₀₉: regresión lineal entre 1973 y 2009; LR₈₉₋₀₉: regresión lineal entre 1989 y 2009). La zona sombreada indica la tasa y desplazamiento previsto considerado como representativo de la evolución prevista para la costa del delta.

Figura 2.62: (Fuente: LIM, 2011)

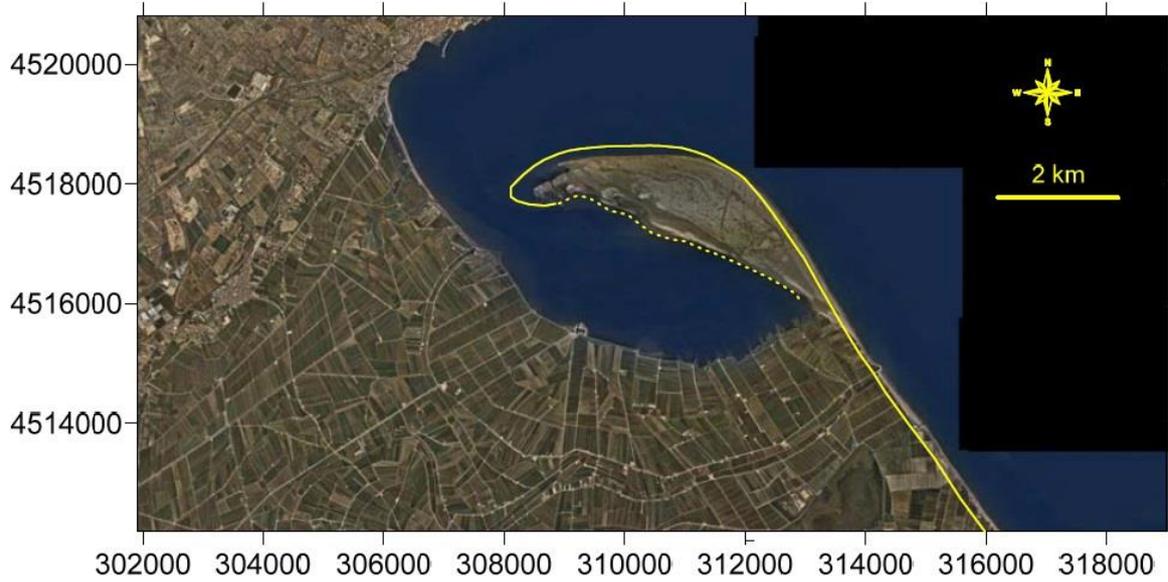


Figura 2.63: Previsión de la evolución de la costa del hemidelta norte en 2050 (Fuente: LIM, 2011)

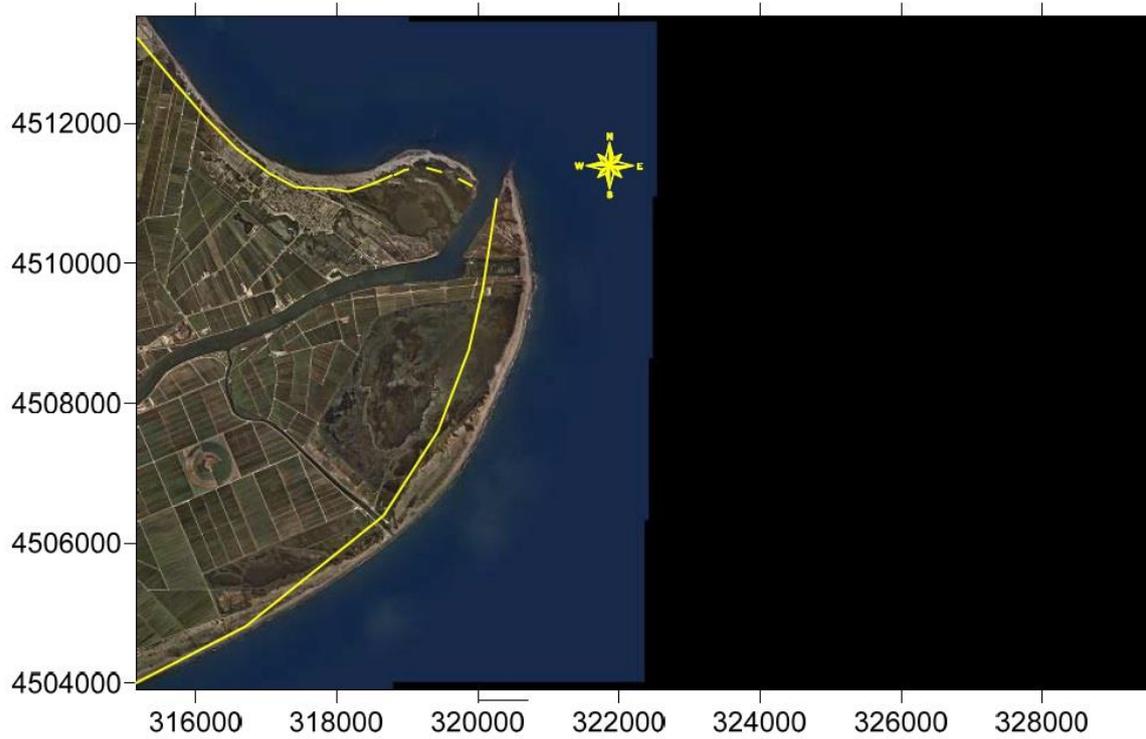


Figura 2.64: Previsión de la evolución de la costa de la punta del Delta en 2050 (Fuente: LIM, 2011)

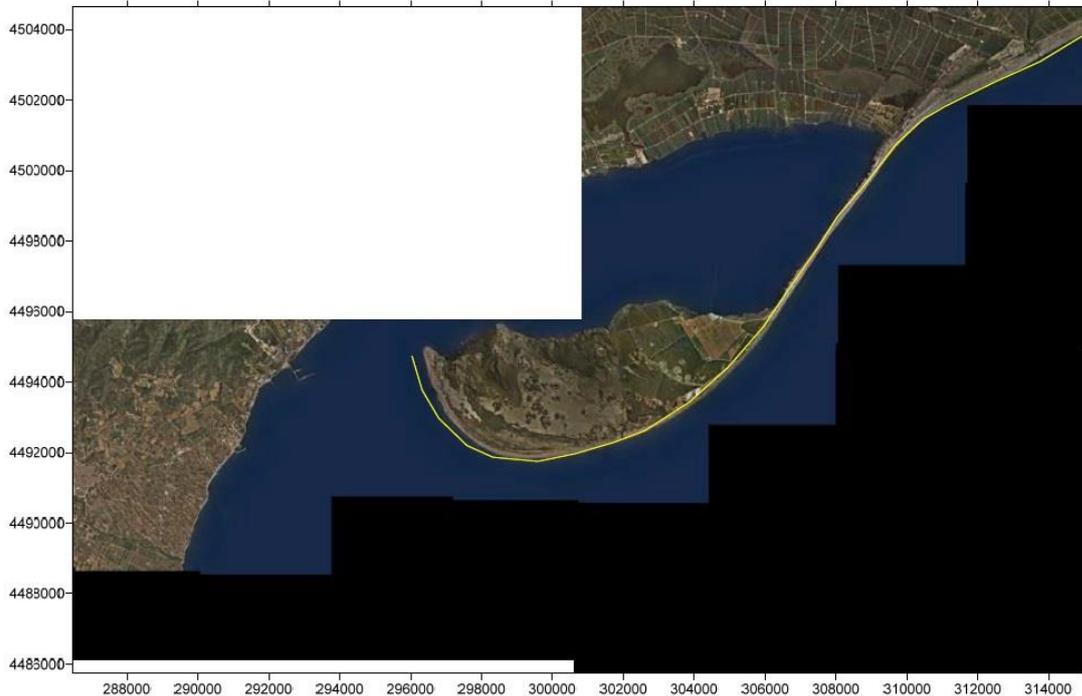


Figura 2.65: Previsión de la evolución de la costa del hemidelta sur en 2050 (Fuente: LIM, 2011)

2.1.5.4 Efecto de la subida del nivel del mar

A continuación, introducen el efecto de la subida del nivel del mar, para ello utilizan la nomenclatura anglosajona RSLR, sobre la evolución de la costa a medio plaza. Utilizan la Regla de Bruun para observar la posible respuesta de la costa a la subida del agua y la acción del oleaje a la vez en cada uno de los perfiles de la costa. El escenario que utilizan es el que se muestra en la Figura 2.66, en el que se ha tenido en cuenta también la previsible subsidencia.

		Escenario (m)		
		Low	Medium	High
comp	eustática (IPCC)	0.10	0.15	0.20
	subsidencia	0.15	0.15	0.15
total ₂₀₅₀	RSLR ₂₀₅₀	0.25	0.30	0.35

Tabla 6.2. Escenarios de RSLR para el año 2050 en el delta del Ebro.

Figura 2.66: (Fuente: LIM, 2011)

La previsión del retroceso esperado en este escenario se muestra en una tabla (Figura 2.67) con los valores en metros y dividido en las zonas que se ha compartimentado la costa del Delta y con las pendientes medias en cada uno de ellos (Figura 2.52).

		Escenario RSLR ₂₀₅₀ (m)		
		Low	Medium	High
sección	pend	0.25	0.30	0.35
Z1(P8)	0.008	31	37	44
Z1(P22)	0.007	36	43	50
Z2	0.004	62	75	87
Z3	0.004	62	75	87
Z4	0.007	36	43	50
Z5	0.007	36	43	50
Z6	0.004	62	75	87
Z7(P39)	0.004	62	75	87
Z7(P22)	0.006	42	50	58
Z7(P2)	0.02	12	15	17

Tabla 6.3. Previsión del retroceso de la línea de orilla para las diferentes secciones a lo largo de la costa del Delta del Ebro para el año 2050 bajo diferentes escenarios de RSLR.

Figura 2.67: (Fuente: LIM, 2011)

2.1.5.5 Evolución del Fangar y los Alfaques

El capítulo 7 se dedica a la evolución de las flechas, norte del Fangar y sur de los Alfaques y la previsión de evolución con la prevista subida del nivel medio del mar debido al cambio climático.

El método y técnica para ese estudio es el mismo apuntado en el capítulo anterior, indicado en los párrafos precedentes. El análisis utilizado se basa en las fotografías aéreas verticales desde 1927 hasta 2010 (Figura 2.68).

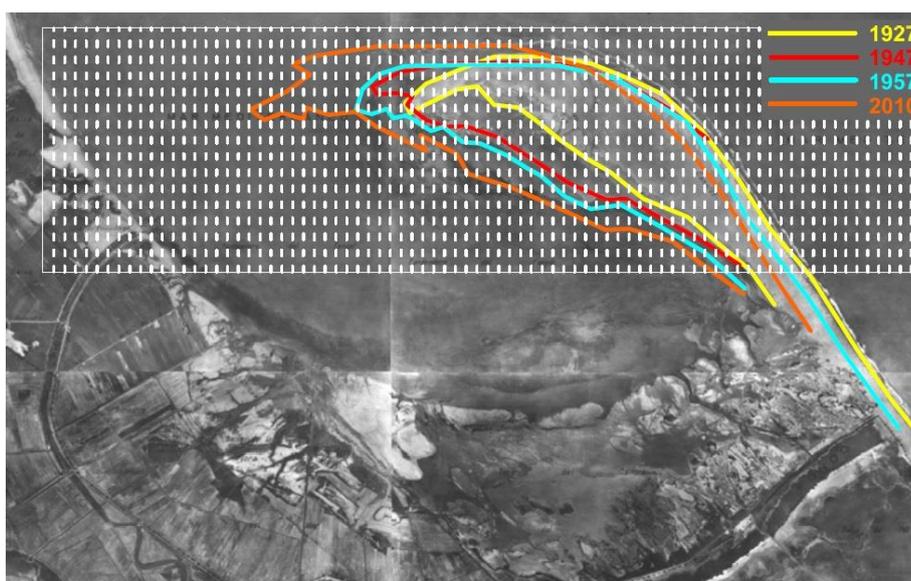


Figura 2.68: Evolución de la flecha del Fangar desde 1927 hasta 2010, sobre la foto de 1927 (Fuente: LIM, 2011)

El análisis de la tendencia evolutiva de la flecha se muestra en la Figura 2.69 que toma como referencia la línea de costa de 1957 y foto de fondo de 2010. Esa tendencia evolutiva se ve corroborada por las diferentes líneas de costa de años intermedios (Figura 2.70).



Figura 2.69: Tendencia evolutiva desde 1957 hasta 2010 (de la foto) (Fuente: LIM, 2011)

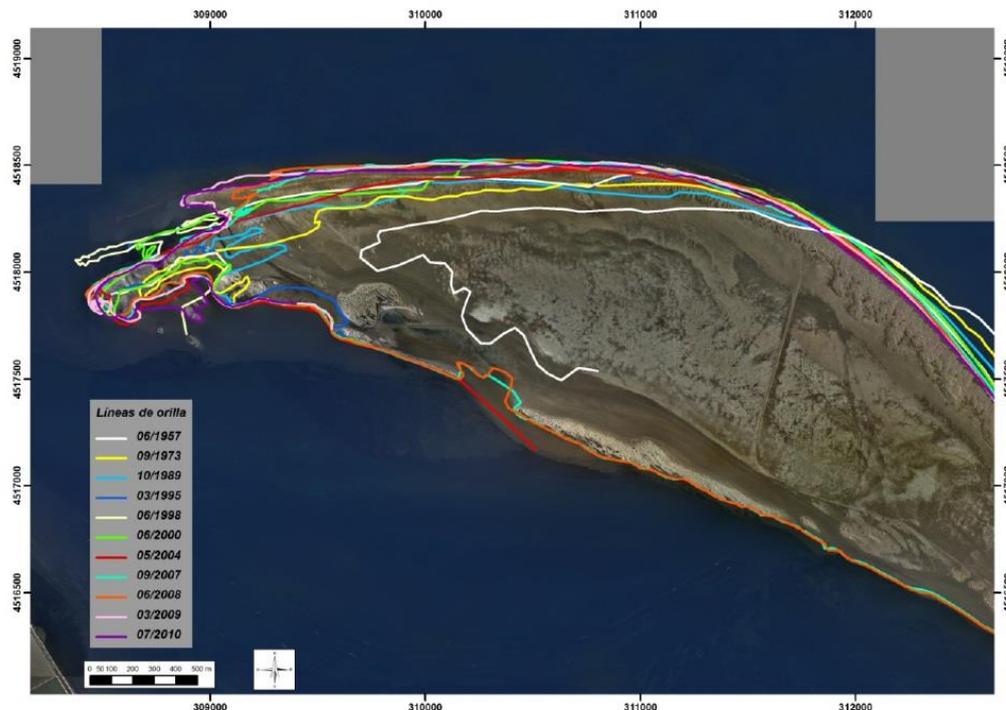


Figura 2.70: Evolución desde 1957 hasta 2010 (de la foto) (Fuente: LIM, 2011)

Los desplazamientos parciales y totales del periodo se muestran en una tabla (Figura 2.71) donde los perfiles son los que aparecen en la Figura 2.69.

perfil	desplaz. (m)	EPR ₅₇₋₀₉ (m/a)	EPR ₅₇₋₇₃ (m/a)	LR ₈₉₋₀₉ (m/a)
1	1330	25.6	35.3	20.6
6	623	12.0	17.7	12.0
8	311	6.0	9.5	8.5
12	224	4.3	6.0	5.1
16	212	4.1	7.1	5.9
22	-6	-0.1	0.3	0
24	-81	-1.4	-0.6	-1.8
28	-208	-4.0	-4.8	-3.5

Tabla 7.1. Desplazamiento de la línea de orilla a lo largo de la Punta del Fangar desde 1957 a 2009 para perfiles representativos (ver localización en figura 7.6). Tasas de desplazamiento (EPR₅₇₋₀₉: inicial y final entre 1957 y 2009; EPR₅₇₋₇₃: inicial y final entre 1957 y 1973; LR₈₉₋₀₉: regresión lineal entre 1989 y 2009).

Figura 2.71: (Fuente: LIM, 2011)

A continuación, hacen una previsión de la evolución futura de esta flecha, que lo muestran en forma de tabla (Figura 2.72) y dibujada sobre la foto de 2010 (Figura 2.73)

perfil	LR ₇₃₋₀₉ (m/a)	ΔX_{2050} (m)	LR ₈₉₋₀₉ (m/a)	ΔX_{2050} (m)
1	9.4	+ 360	20.6	+ 820
6	8.0	+ 230	12.0	+ 420
8	4.8	+ 165	8.5	+ 340
12	3.8	+ 155	5.1	+ 210
16	3.2	+ 120	5.9	+ 245
22	0 (*)	+ 9 (*)	0 (*)	+ 12 (*)
24	-1.7	- 60	-1.8	- 60
28	-3.6	- 145	-3.5	- 145

Tabla 7.2. Tasa de evolución de la línea de orilla a largo plazo (LR) y predicción para el año 2050 del desplazamiento con respecto a la posición actual (ΔX) a lo largo de la Punta del Fangar para perfiles representativos (ver localización en figura 7.6). (LR₇₃₋₀₉: regresión lineal entre 1973 y 2009; LR₈₉₋₀₉: regresión lineal entre 1989 y 2009).

Figura 2.72: (Fuente: LIM, 2011)



Figura 2.73: Evolución futura, año 2050, sobre la foto de 2010 (Fuente: LIM, 2011)

Siguiendo la misma técnica y valores previstos de subida del nivel del mar, hacen una perspectiva del retroceso de la línea de costa en este sector debido al impacto del cambio climático que muestran en una tabla (Figura 2.74).

		Escenario (m)		
		Low	Medium	High
total ₂₀₅₀	RSLR ₂₀₅₀ (m)	0.25	0.30	0.35
P8	ΔX_{2050} (m)	31	37	44
P22	ΔX_{2050} (m)	36	43	50

Tabla 7.4. Previsión del retroceso de la línea de orilla en diferentes secciones de la Punta del Fangar para el año 2050 bajo diferentes escenarios de RSLR.

Figura 2.74: (Fuente: LIM, 2011)

Lo mismo se hace con la flecha, o barra, del Trabucador y la punta de la Banya. Así, primeramente se compara el estado de entonces, 2010, con la fotografía más antigua de 1927 y dos estados posteriores de los años 1947 y 1957 (Figura 2.75).

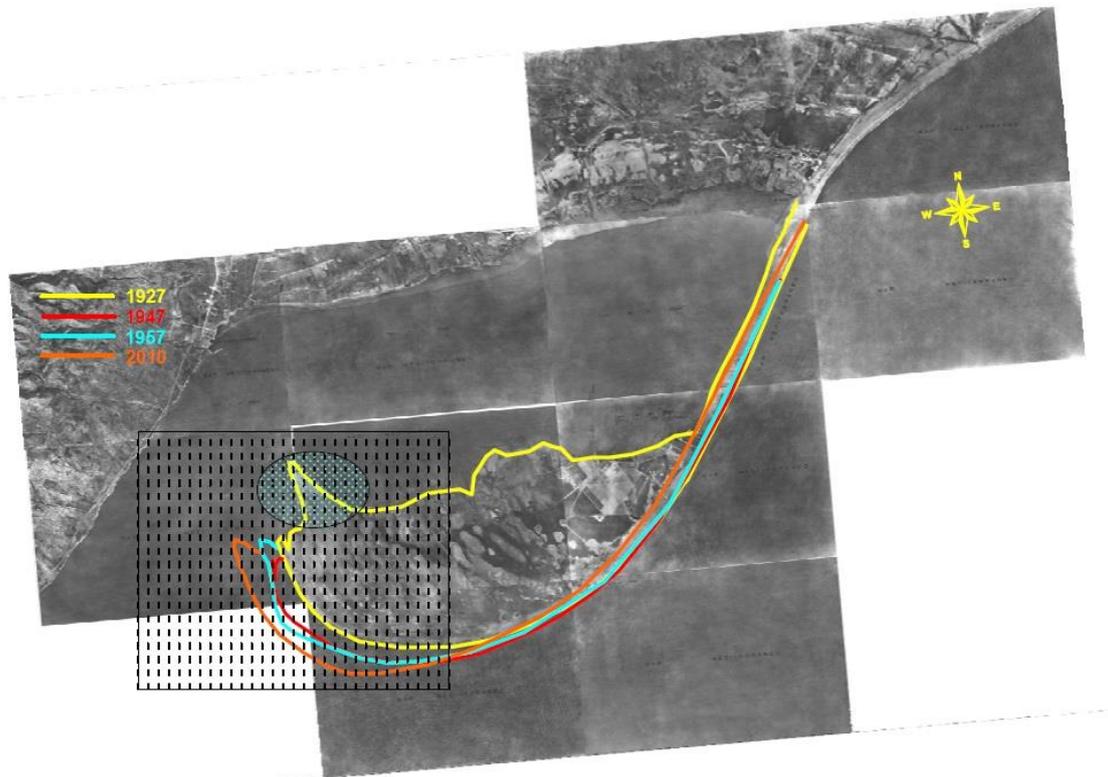


Figura 2.75: Evolución de la barra del Trabucador y punta de la Banya (Fuente: LIM, 2011)

El análisis de la tendencia evolutiva del conjunto flecha y punta se muestra en la Figura 2.76, que toma como referencia la línea de costa de 1957 y de foto de fondo la de 2010. Esa tendencia evolutiva se ve corroborada por las diferentes líneas de costa de años intermedios (Figura 2.77).

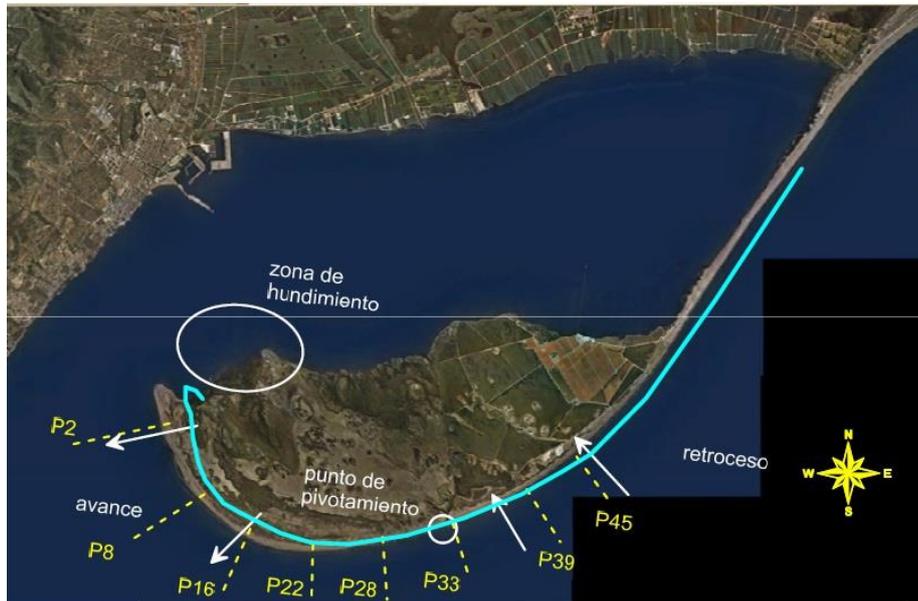


Figura 2.76: Tendencia evolutiva desde 1957 hasta 2010 (de la foto) (Fuente: LIM, 2011)

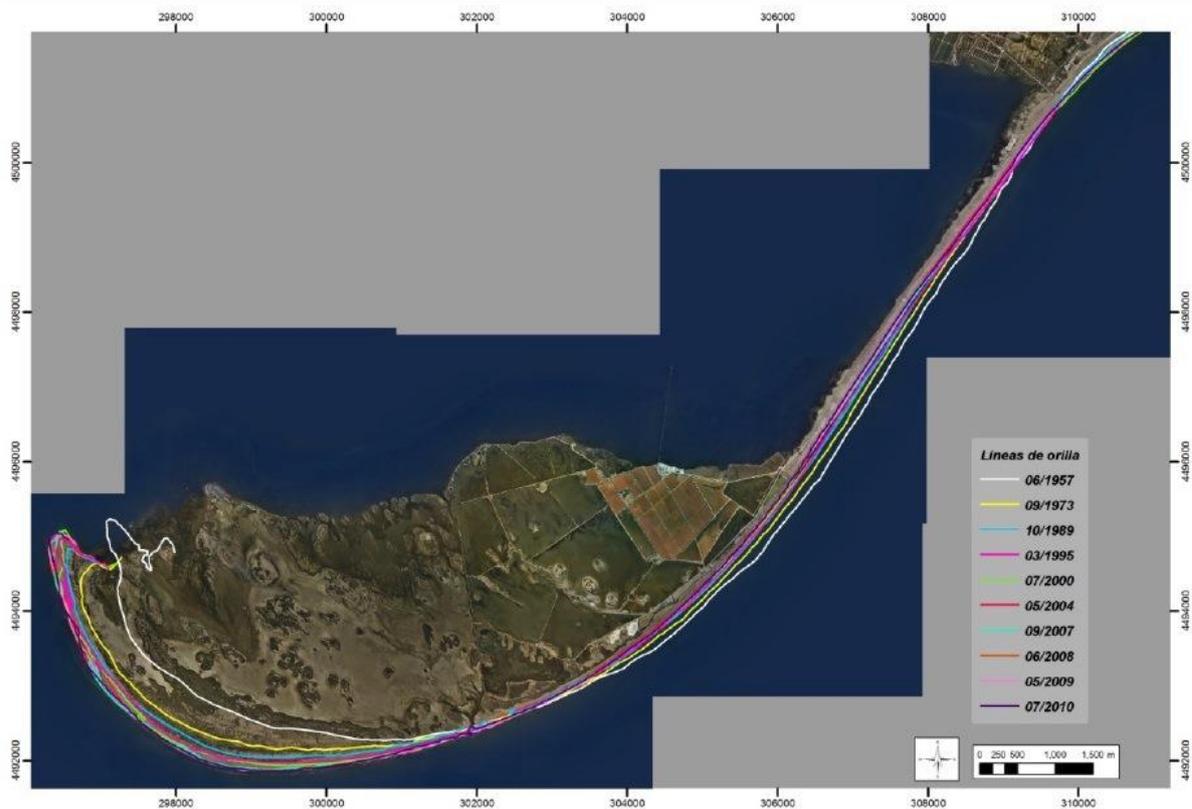


Figura 2.77: Evolución desde 1957 hasta 2010 (de la foto) (Fuente: LIM, 2011)

Los desplazamientos parciales y totales del periodo se muestran en forma de tabla (Figura 2.78) donde los perfiles son los que aparecen en la Figura 2.76.



PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

Anejo 5. Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro

CEDEX

perfil	desplaz. (m)	EPR ₅₇₋₁₀ (m/a)	EPR ₅₇₋₇₃ (m/a)	LR ₈₉₋₁₀ (m/a)
2	+834	15.7	8.3	7.3
8	+667	12.6	7.4	7.9
14	+746	14.1	9.2	9.3
20	+490	9.2	6.8	7.1
26	+136	2.6	1.8	3.4
33	-3 (*)	-0.1 (*)	0.6	-0.01 (*)
39	-74	-1.4	-1.1	0.2 (*)
45	-192	-3.6	-2.8	-1.4

Tabla 7.5. Desplazamiento de la línea de orilla a lo largo de la Punta de la Banya desde 1957 a 2010 para perfiles representativos (ver localización en figura 7.25). Tasas de desplazamiento (EPR₅₇₋₁₀: inicial y final entre 1957 y 2010; EPR₅₇₋₇₃: inicial y final entre 1957 y 1973; LR₈₉₋₁₀: regresión lineal entre 1989 y 2010).

Figura 2.78: (Fuente: LIM, 2011)

A continuación hacen una previsión de la evolución futura del conjunto hasta 2050 que se muestra dibujada con las líneas de 1957 y 1989 (Figura 2.79) y en una tabla (Figura 2.80).

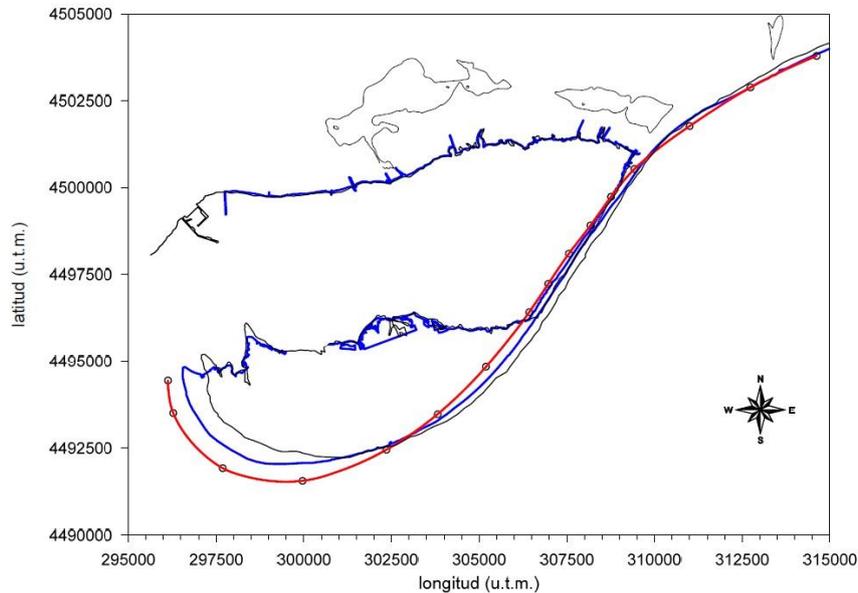


Figura 7.33. Simulación de la evolución del sistema Trabucador-La Banya desde el año 1989 (azul) hasta el año 2050 (rojo). Se incluye el año 1957 (negro) como referencia.

Figura 2.79: (Fuente: LIM, 2011)

perfil	LR ₇₃₋₀₉ (m/a)	ΔX_{2050} (m)	LR ₈₉₋₁₀ (m/a)	ΔX_{2050} (m)
3	8.7	+385	7.3	+320
8	7.9	+340	7.9	+340
14	9.3	+373	9.3	+373
20	6.8	+275	7.1	+285
26	2.4	-108	3.4	+153
33	0.5(*)	+19	-0.01(*)	-3
39	-0.8	-30(*)	0.2(*)	+15
45	-2.6	-112	-1.4	-57

Tabla 7.6. Tasa de evolución de la línea de orilla a largo plazo (LR) y predicción para el año 2050 del desplazamiento con respecto a la posición actual (ΔX) a lo largo de la Punta de la Banya para perfiles representativos (ver localización en figura 7.26). (LR₇₃₋₁₀: regresión lineal entre 1973 y 2010; LR₈₉₋₁₀: regresión lineal entre 1989 y 2010). (*): tasas no significativas)

Figura 2.80: (Fuente: LIM, 2011)



Siguiendo la misma técnica y valores de subida del nivel del mar previsto, hacen una perspectiva del retroceso de la línea de costa en este sector debido al impacto del cambio climático que muestran en una tabla (Figura 2.81).

		Escenario (m)		
		Low	Medium	High
total₂₀₅₀	RSLR₂₀₅₀ (m)	0.25	0.30	0.35
P2	ΔX_{2050} (m)	12	15	17
P22	ΔX_{2050} (m)	42	50	58
P39	ΔX_{2050} (m)	62	75	87

Tabla 7.7. Previsión del retroceso de la línea de orilla en diferentes secciones de la Punta de la Banya para el año 2050 bajo diferentes escenarios de RSLR.

Figura 2.81: (Fuente: LIM, 2011)

2.1.5.6 Zonas potencialmente inundables

El capítulo 8 lo dedican a estudiar las zonas potencialmente inundables de la llanura deltaica, sin tener en cuenta el escenario costero. Lo hacen en tres escenarios de subida del nivel del mar (Figura 2.82).

		Escenario (m)		
		Low	Medium	High
comp	eustática (IPCC)	0.18*	0.38*	0.59*
	subsistencia	0.2-0.3-0.4	0.2-0.3-0.4	0.2-0.3-0.4
total	RSLR	0.50 ± 0.10	0.70 ± 0.10	0.90 ± 0.10

* valores redondeados a 0.20, 0.40 y 0.60 m

Figura 2.82: Escenarios de subida del nivel del mar debido al cambio climático (Fuente: LIM, 2011)

“La metodología utilizada para determinar las zonas potencialmente inundables es la propuesta por Martin (1993) en la que se combina el uso de DEMs con Sistemas de Información Geográfica.”

Se realiza un estudio pormenorizado de las zonas inundables con la subida del nivel del mar, no solamente en escenarios de diferentes ascensos; sino también, para situaciones de abertura o cierre de canales en el hemidelta norte (Figura 2.83).

Entre las consecuencias del ascenso del nivel del mar es que se reduce el periodo de retorno de eventos especiales, como son la incidencia de los temporales. Finalmente, indican que “los diferentes escenarios de RSLR se interpretan como niveles de probabilidad, por lo que, si el nivel del mar aumenta, independientemente de la cantidad, las zonas más bajas del delta serían las primeras en verse afectadas”. (Figura 2.84).



PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

Anejo 5. Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro

CEDEX

RSLR (m)	superficie inundada (ha)		% reducción
	canales abiertos	canales cerrados	
0.10	470	470	0
0.20	1780	670	62
0.30	2770	1010	64
0.40	4420	1550	65
0.50	5620	2220	60
0.60	6530	2780	57
0.70	7270	3190	56
0.80	7980	3570	55
0.90	8590	7350	14

Tabla 8.3. Comparación de superficies potencialmente inundables en el hemidelta Norte para diferentes RSLR con los canales abiertos y cerrados.

Figura 2.83: (Fuente: LIM, 2011)

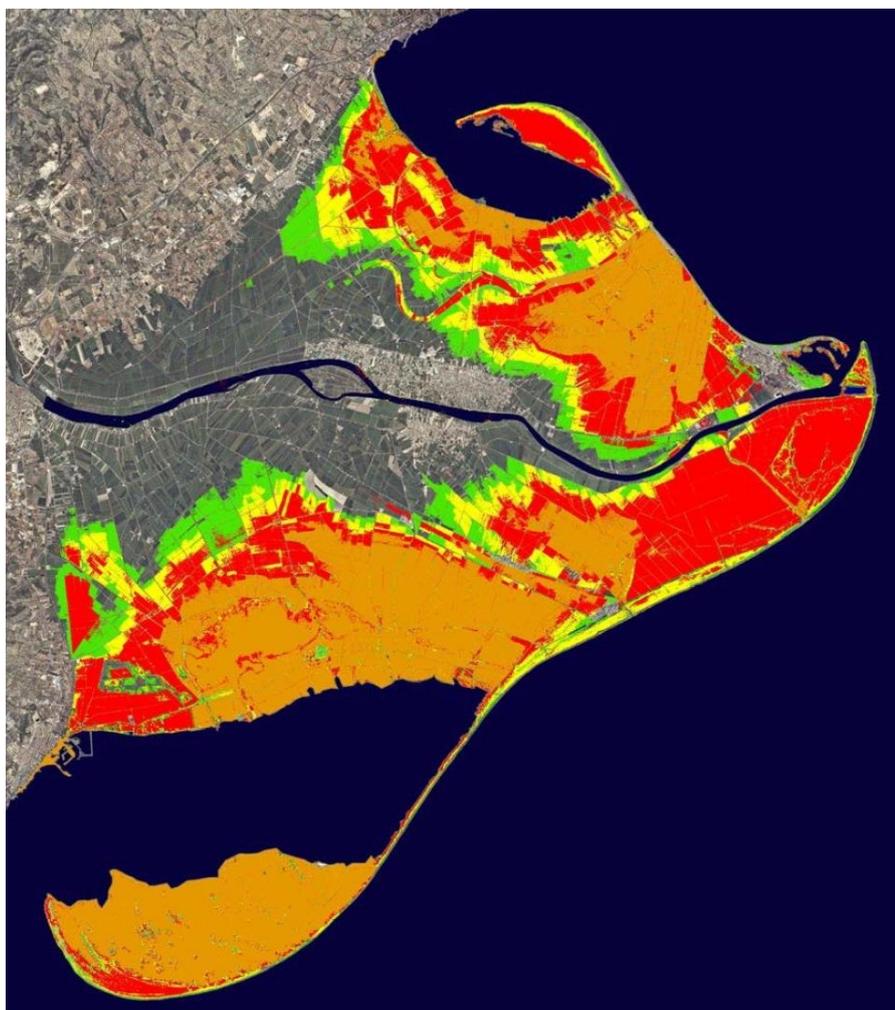


Figura 2.84: Zonas de riesgo a inundación en el Delta del Ebro. Naranja: riesgo muy alto; rojo: riesgo alto; amarillo: riesgo medio; verde: riesgo bajo. (Fuente: LIM, 2011)

2.1.5.7 Efecto de los temporales

El siguiente capítulo está dedicado a los efectos que producen los temporales en el Delta y las inundaciones que produce. En el que dicen: “los mayores impactos en la costa inducidos por temporales se producen bajo condiciones en las que coexisten olas de gran altura y un nivel de mar elevado por causas meteorológicas (Jiménez et al., 1997).”

Lo primero que hacen es identificar las zonas donde se han producido los principales problemas en la costa del Delta debido a temporales (Figura 2.85).

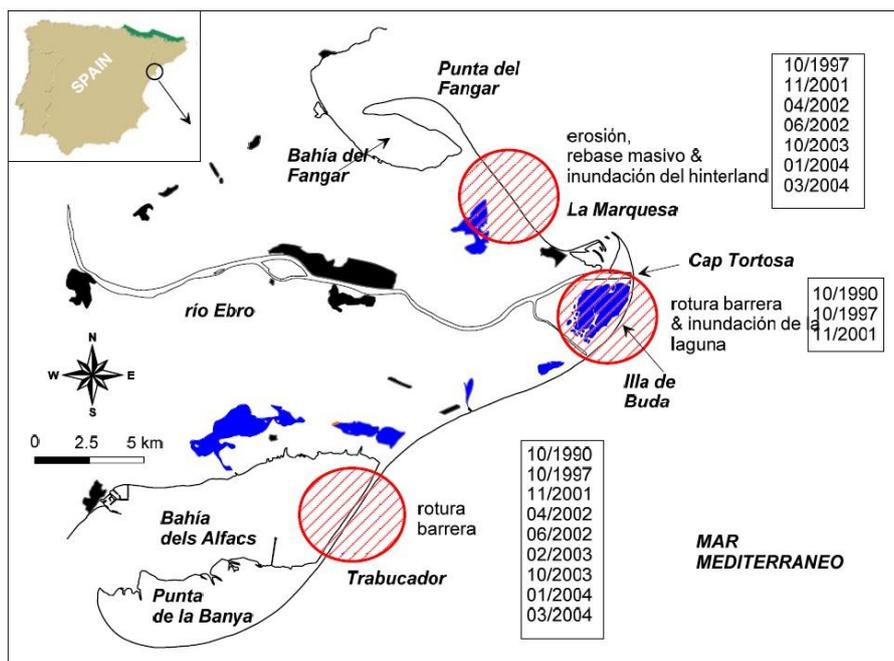


Fig. 9.1. Zonas vulnerables al impacto de tormentas a lo largo de la costa del delta del Ebro y tipo de impacto y eventos importantes hasta el año 2005 (Jiménez et al. 2005, 2011).

Figura 2.85: (Fuente: LIM, 2011)

Un ejemplo importante de estos efectos es el que presentan del temporal producido en noviembre de 2001: “el comportamiento de la playa del Trabucador al impacto de tormentas extremas se ilustra en la figura 9.2 [Figura 2.86] con el temporal de noviembre de 2001. La morfología de esta zona con un ancho de unos 150 m y una elevación máxima de unos 1.5 m sobre el nivel del mar hace que su respuesta típica sea el rebase masivo y la rotura de la barrera, produciéndose un transporte de grandes cantidades de sedimento hacia el interior de la Bahía (e.g., Sánchez-Arcilla y Jiménez, 1994).”



Figura 1.104: Rotura de la barra del Trabucador en noviembre de 2001 (Fuente: LIM, 2011)

Para determinar este efecto, se van realizando una serie de pasos metodológicos:

- 1) Se estima el nivel del mar total en la costa: El nivel del mar total en la costa es la suma del nivel medio del mar, la marea astronómica, la marea meteorológica y el remonte que caracteriza usando la fórmula de Stockdon et al. (2006).
- 2) Se evalúa la repuesta que tiene la costa que dependerá tanto de las características del temporal como de las propias de la playa donde incide.
- 3) Se estima la tasa de rebase (Q) para aquellas situaciones donde el oleaje sobrepase la cota de la playa. Utilizando el método propuesto por FEMA (2003) [Jones, 2005]
- 4) La topografía usada, consiste en un modelo digital del terreno obtenido a partir de un Lidar.
- 5) Los temporales se caracterizan por los datos obtenidos de la boya del Cabo Tortosa de GENCAT. (Figura 2.87).
- 6) Aplicación del modelo SBEACH a la playa Marquesa.

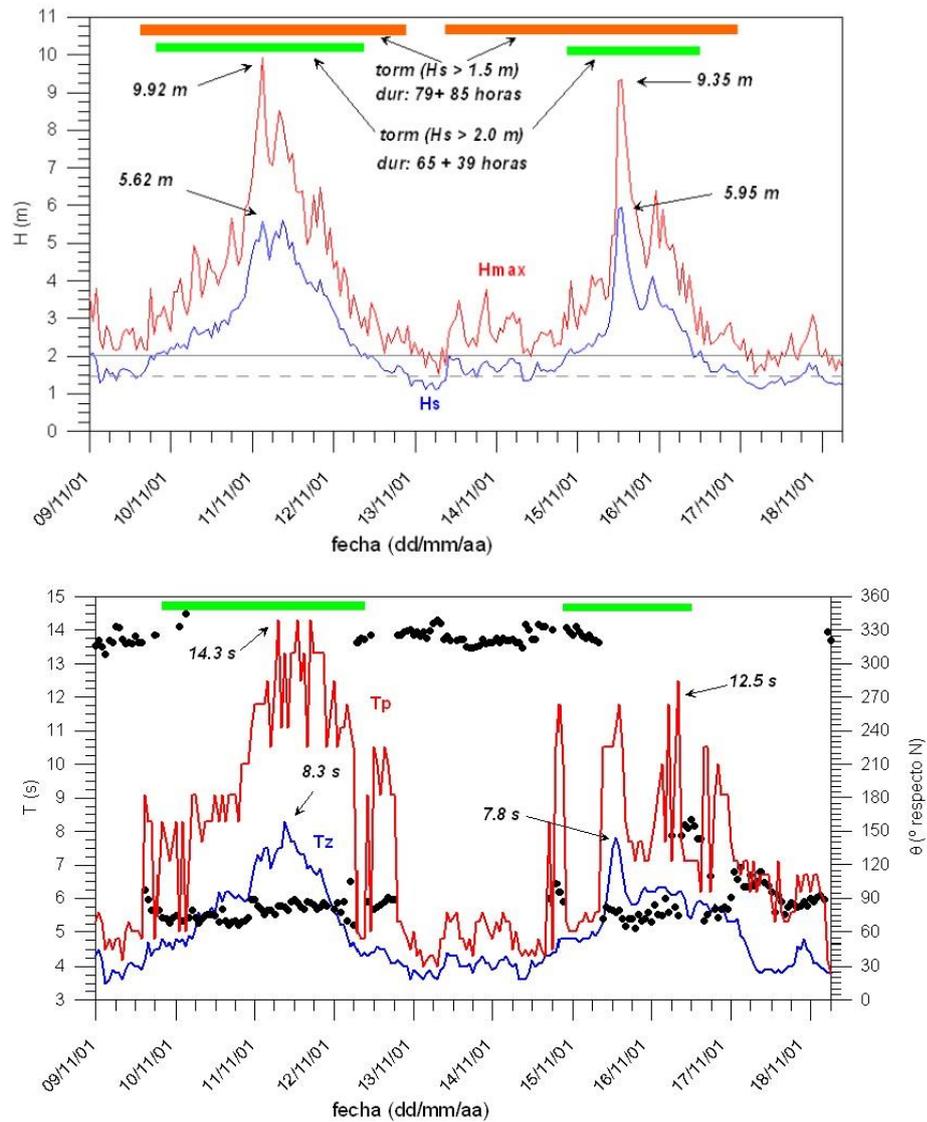


Figura 9.8. Características del oleaje durante la tormenta de noviembre de 2001 registradas por la boya de Cap Tortosa.

Figura 2.87: (Fuente: LIM, 2011)

2.1.5.8 Soluciones

El capítulo 10 lo dedican al problema y las posibles soluciones a éste. Lo primero que hacen es definir lo que es problema, para ello, solamente contemplan dos escenarios:

- 1- Cuando el retroceso de la línea de costa afecta a algún elemento rígido que impide la evolución natural de la playa.
- 2- Cuando el retroceso afecte a algún recurso o uso del territorio

Y se esquematiza en una figura (Figura 2.88).

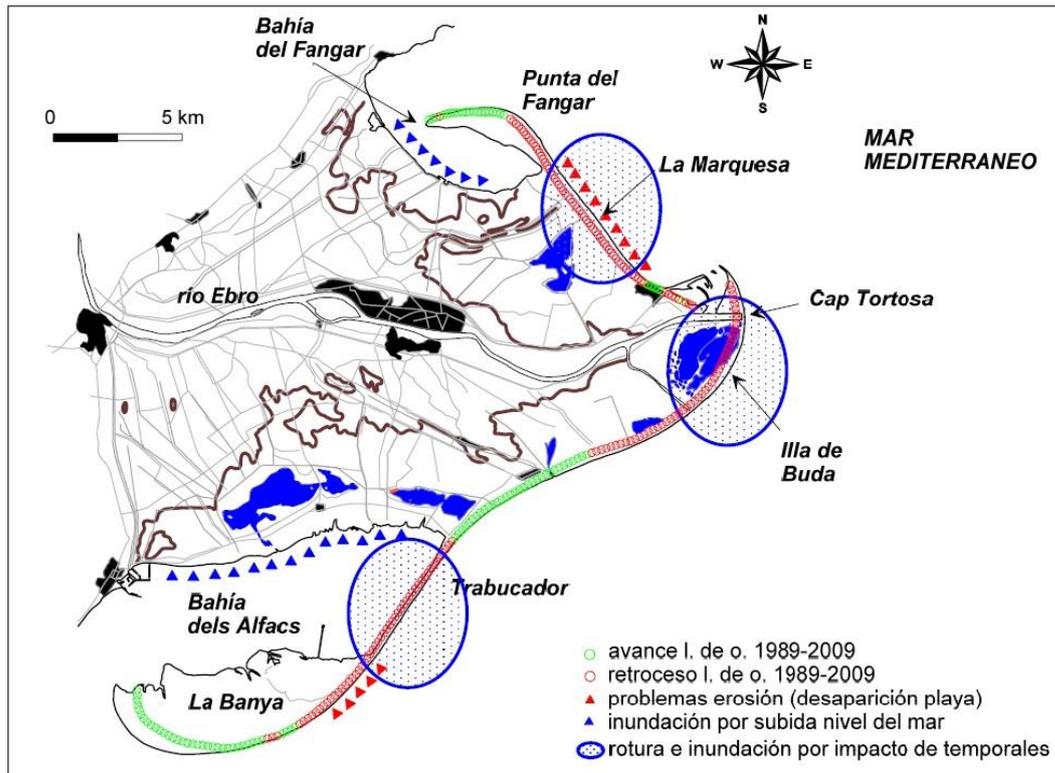


Figura 2.88: Problemas a lo largo de la costa del Delta del Ebro (Fuente: LIM, 2011)

La principal zona sometida a problemas son, relacionados con la erosión:

- La Playa de la Marquesa en el hemidelta Norte.
- La Punta de la Banya inmediatamente al sur de la Playa del Trabucador
- La playa del Trabucador, con retroceso y migración de la barrera hacia el interior
- La Illa de Buda y el Trabucador, rotura de la playa barrera en temporales.

Finalmente, muestran las variables que definen las zonas con problemas en una tabla (Figura 2.89).

A continuación tratan de las soluciones propuestas para estos problemas, que son:

Costa de las bahías interiores: “Estrategia de retirada/adaptación, en la que se recupera ambiental y paisajísticamente una franja de unos 100 m de ancho a lo largo de la costa. Asimismo a lo largo de la misma se reconstruye una mota de 1,5 m de altura en la parte interna de esta franja que serviría de barrera a la inundación de la zona juntamente con un control adecuado de los canales de drenaje existentes en la zona.

zona	proceso	escala	efecto
La Marquesa	retroceso l. de orilla	años-décadas	desaparición playa / exposición límite campos
	inundación	episódica (tormenta)	input agua y sedimento a campos de arroz
	inundación	largo plazo RSLR	inundación permanente zona
La Banya	retroceso l. de orilla	años-décadas	desaparición playa / exposición dique salinas
Illa de Buda	rotura/inundación	episódica (tormenta)	input agua y sedimento al lagoon
	inundación	largo plazo RSLR	inundación permanente zona
Trabucador	rotura/inundación	episódica (tormenta)	rotura conexión la Banya / afectación explotación salina
	retroceso l. de orilla		exposición tendido eléctrico
Costa Bahías / plana deltaica	inundación	largo plazo RSLR	inundación permanente zona

Figura 2.89: Zonas y variables que definen y determinan los problemas costeros en el Delta del Ebro (Fuente: LIM, 2011)

Playa de la Marquesa: “Generar a lo largo de la costa una franja lo suficientemente ancha como para que a una escala de cómo mínimo unos 50 años, la playa sea capaz de adaptarse de forma natural a los procesos actuantes sin que se genere ningún problema sobre los usos y/o recursos existentes. Así, se plantea el diseño de un nuevo perfil a lo largo de La Marquesa, incluyendo la incorporación de un tramo de plana deltaica al dominio público, creando una zona de playa en el que se promovería la creación y/o desarrollo de ecosistemas característicos de la zona y que tuviera un ancho suficiente para actuar a modo de buffer para la dinámica litoral”. El ancho calculado de la playa de la Marquesa era de 430 m (Figura 2.90).

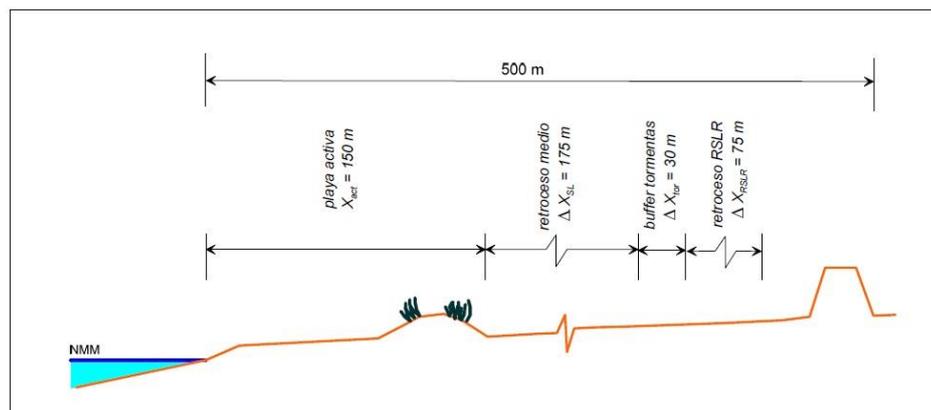


Figura 2.90: Componentes que determinan el perfil completo de la zona a ganar a lo largo de la Playa de la Marquesa (Fuente: LIM, 2011)



CEDEX

2.1.6 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero, desembocadura y cauce inferior del delta del Ebro” (IHAC y LIM, 2012)

Es un trabajo realizado conjuntamente por las universidades de Cantabria, a través del IHAC, y Politécnica de Cataluña, a través del LIM para el Ministerio de Medio Ambiente. Se estructura en dos secciones, aparte de la introducción, siendo éstas:

- 1- Estudio y análisis de actuación y gestión del frente costero del delta del Ebro
- 2- Estudio y análisis de actuación y gestión de la desembocadura y el cauce inferior del río Ebro

2.1.6.1 Estudio y análisis de actuación y gestión del frente costero del delta del Ebro

La estructura de esta sección es similar al trabajo del LIM (2011). Primeramente trata de la evolución de la costa hasta 2009, repitiendo en muchos casos las figuras del completo trabajo antes indicado. Divide la costa para ello en: Hemidelta norte; hemidelta sur, península del Fangar; y Punta de la Banyà.

A continuación hacen una previsión de evolución futura, siguiendo la metodología del trabajo de 2011. Lo mismo hace con el efecto de la subida del nivel del mar debido al cambio climático y la inundación del frente costero.

Los problemas y soluciones planteadas son las mismas que un año antes habían propuesto en el informe del LIM (2011).

2.1.6.2 Estudio y análisis de actuación y gestión de la desembocadura y el cauce inferior del río Ebro

Se sigue la misma estructura de la sección anterior y del informe del que se basa (LIM, 2011), con dos apartados nuevos titulados: “Análisis específico de las condiciones de navegación en el cauce inferior del río y de la desembocadura” y “Variabilidad de largo plazo de la cuña salina”.

En definitiva no introducen ninguna novedad al estudio costero del Delta del Ebro respecto al informe del LIM (2011).

2.1.7 “Informe síntesis sobre la vulnerabilidad del delta del Ebro. Propuesta de medidas generales en el ámbito del Delta” (Berga y Berga, 2017).

Este informe fue redactado por Luíís Berga Casafont y Luis Berga Martínez para la Comunitat de Regants del Canal de la Dreta.

El documento contiene las directrices básicas de actuación sobre el Delta del Ebro cuyos objetivos indicados en él son: 1) Análisis del efecto del cambio climático en el Delta, y 2) Planteamiento de actuaciones para la defensa del Delta.

Formalmente, está estructurado en 14 capítulos, siendo el primero de ellos introductorio, donde se exponen los objetivos del trabajo.

2.1.7.1 Propuesta de actuaciones para la adaptación al Cambio Climático

El capítulo 2 se ocupa de presentar las propuestas para afrontar la subida del nivel del mar debido al cambio climático. Las soluciones que plantea son un modelo a la holandesa de defensa del territorio y la parte de llanura deltaica que puede quedar a cotas inferiores o similares al nivel medio del mar en el futuro. Como elementos de protección (Figura 2.91) se proponen tres actuaciones básicas:

- 1- Construcción de un camino de guarda (dique de protección) en una longitud de unos 50 km para la protección de la llanura deltaica con cotas entre 1,5 y 2 m y ancho de 4 a 5 m.
- 2- Recrecimiento de las flechas deltaicas con aportación de arena hasta una altura entre 1 y 2 m.
- 3- Protección del frente costero mediante dunas en islas litorales exentas de baja cota.

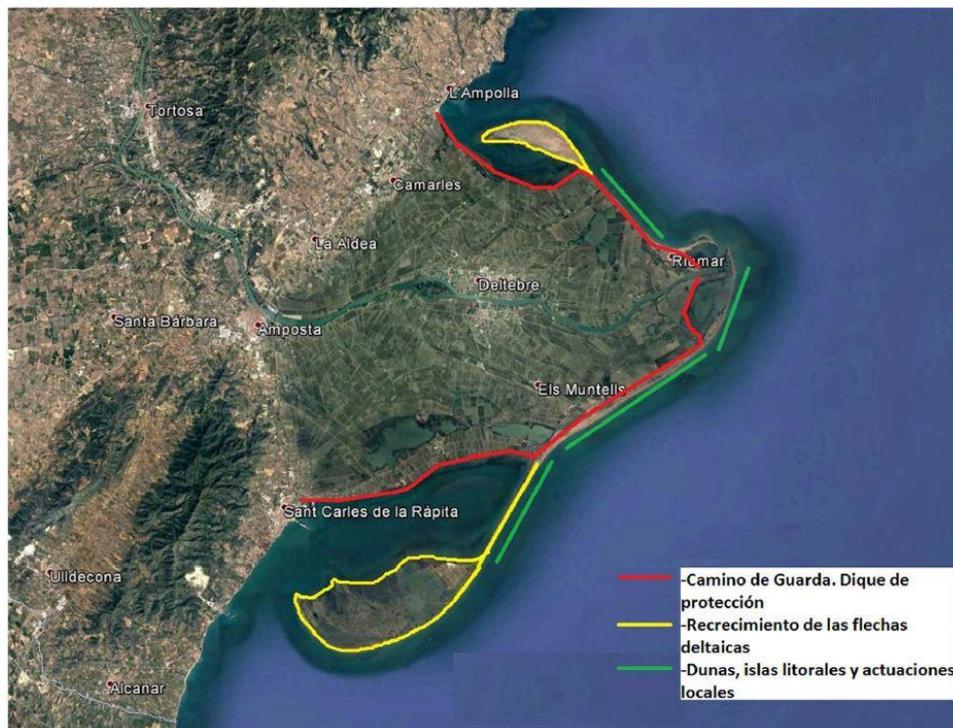


Figura 2.91: Actuaciones planteadas para la defensa del delta del Ebro contra el cambio climático por la Comunidad de Regantes (Berga y Berga, 2017)

Los siguientes capítulos están dedicados a: Los deltas del Mediterráneo. Problemática común (capítulo 3); El delta del Ebro (descriptivo, red hidrológica, evolución, morfología, etc.) (capítulo 4); Infraestructuras de regadío en el delta del Ebro (capítulo 5); Rio Ebro. Aguas superficiales y régimen hidrológico en el delta (capítulo 6); Caudales ecológicos; requerimientos ecológicos y balances (capítulo 7); Cuña salina y salinidad (capítulo 8).

2.1.7.2 Regresión, sedimentos y subsidencia

El capítulo 9 se dedica al análisis del oleaje, cuyos datos son un poco pobres; a la evolución de la costa en el que dice que debido al cambio de la desembocadura en 1937 y retenciones en los embalses, además de la subsidencia y de la subida del nivel del mar debido al cambio

climático, la costa del Delta ha sufrido cambios, principalmente a partir de los años de pasado siglo. Y debido a ello, la superficie del Delta habría sufrido una pérdida de superficie en la segunda mitad del siglo pasado (Figura 2.92).

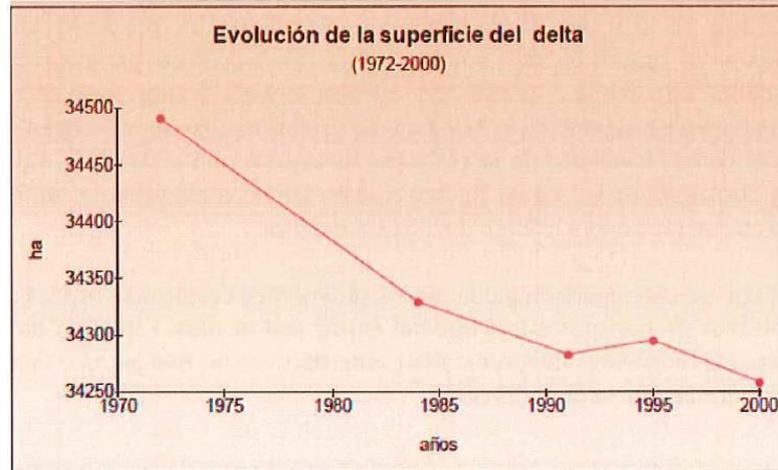


Figura 2.92: Evolución de la superficie del Delta entre 1970 y 2000 (Fuente: Berga y Berga, 2017)

También trata del transporte de sedimentos, haciéndose eco (sin nombrarlo) de los datos del LIM, (Figura 2.93 que es la misma que 2.2).

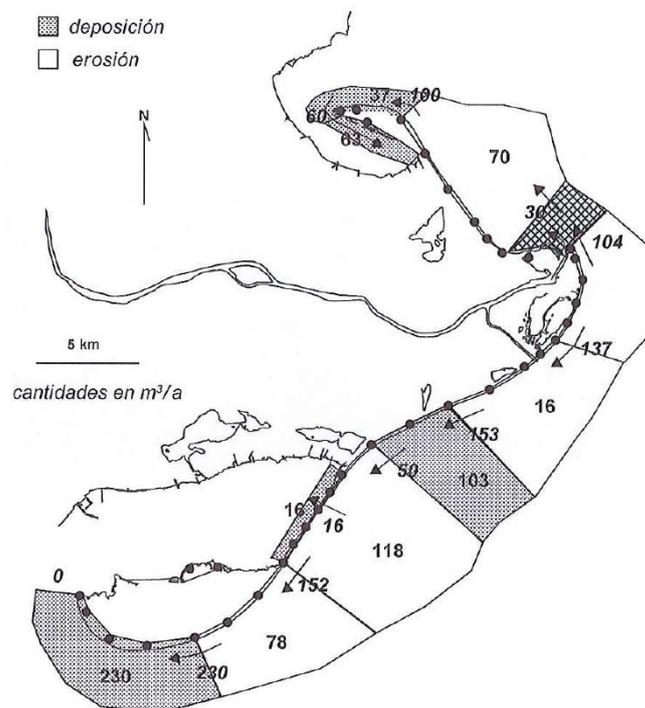


Figura 2.93: Transporte longitudinal de sedimentos, la misma figura que 2.2 del LIM (Fuente: Berga y Berga, 2017)

A continuación analizan la evolución de tres sectores: primeramente la zona del Cabo Tortosa y desembocadura, luego la zona norte del hemidelta y al final lo hacen de la zona sur del hemidelta.

En la zona del Cabo Tortosa y desembocadura, comparan la costa entre 1957 y 1989 (Figura 2.94); obteniendo unas tasas evolutivas en cinco perfiles (Figura 2.95).

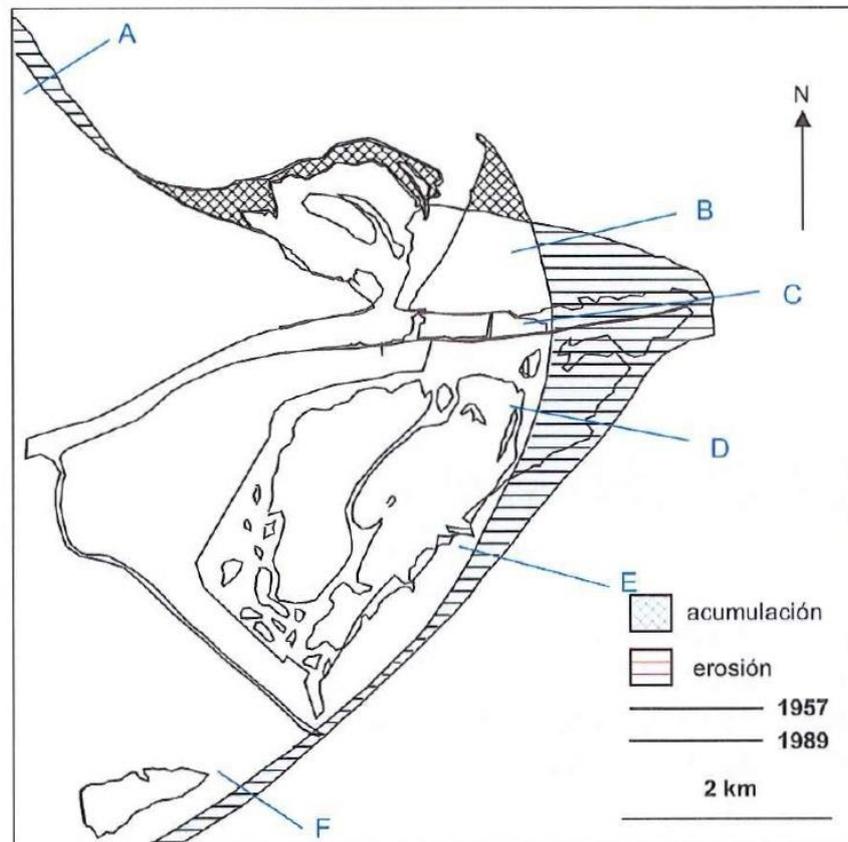


Figura 2.94: Evolución de la costa entre 1957 y 1989 y perfiles de control en el entorno de la desembocadura (Fuente: Berga y Berga, 2017)

período	A	B	C	D	E	F
1957/73	-6	-20	-70	-24	-3	-4
1973/90	-3	-10	-21	-14	-11	-2
1990/98	-2	-10	-12	-12	-6	5

Figura 2.95: Desplazamientos de la línea de orilla en los perfiles de control señalados en la Figura 1,113 (Fuente: Berga y Berga, 2017)

Igualmente hacen en la zona del hemidelta norte; que comparan la costa entre 1957 y 1989 (Figura 2.96), y obtienen unas tasas evolutivas en cinco perfiles (Figura 2.97).

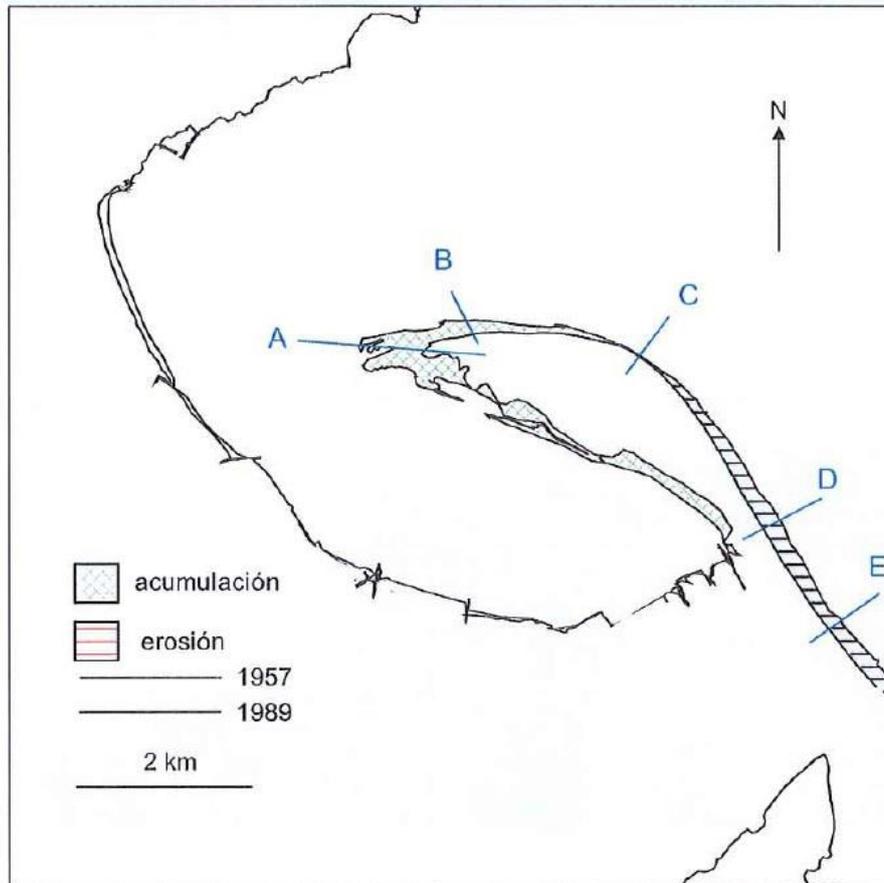


Figura 2.96: Evolución de la costa entre 1957 y 1989 y perfiles de control en el hemidelta norte (Fuente: Berga y Berga, 2017)

período	A	B	C	D	E
1957/73	44	7	0	-12	-10
1973/90	8	5	1	-7	-3
1990/98	68	2	1	-2	-2

Figura 2.97: Desplazamientos de la línea de orilla en los perfiles de control señalados en la Figura 2.96 (Fuente: Berga y Berga, 2017)

Y lo mismo hacen en la zona del hemidelta sur; que comparan la costa entre 1957 y 1989 (Figura 2.98), obteniendo unas tasas evolutivas en siete perfiles (Figura 2.99).

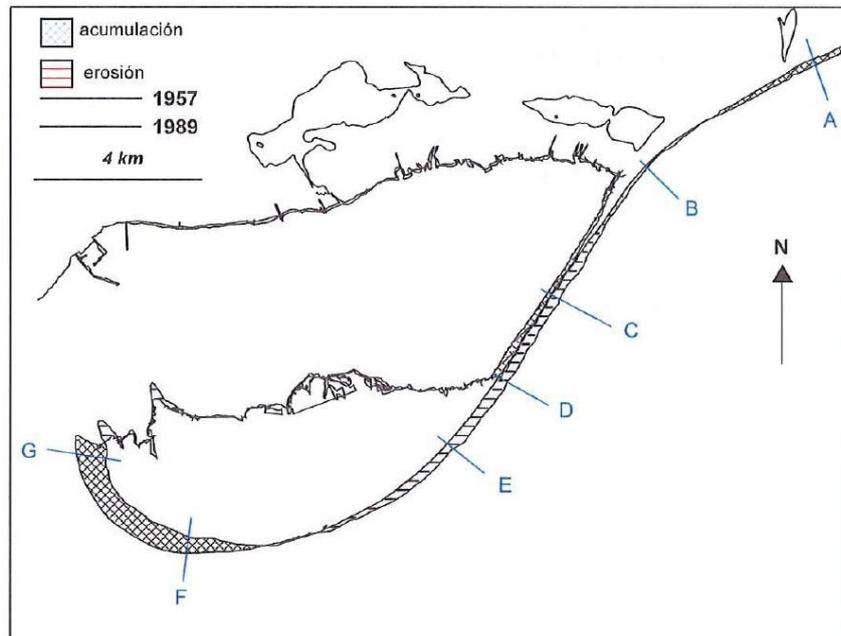


Figura 2.98: Evolución de la costa entre 1957 y 1989 y perfiles de control en el hemidelta norte (Fuente: Berga y Berga, 2017)

período	A	B	C	D	E	F	G
1957/73	3	2	-6	-6	-3	19	25
1973/90	10	0	-3	-6	-5	9	14
1990/98	10	1	-1	-3	-5	5	9

Figura 2.99: Desplazamientos de la línea de orilla en los perfiles de control señalados en la Figura 2.98 (Fuente: Berga y Berga, 2017)

Las causas que aportan para justificar la regresión son:

- Subsistencia del Delta
- Subida relativa del nivel del mar
- Cambios morfológicos de la costa
- Obras costeras
- Disminución de aportes de sedimentos

A continuación hacen un interesante estudio de los aportes de sedimentos del río al Mar, y en una gráfica resumen los diferentes valores de la carga sólida aportada por el río de diversos autores (Figura 2.100). Al final resumen la carga sólida aportada por el río desde comienzos del siglo XX, siendo ésta:

- Principios del siglo XX: $20-25 \cdot 10^6$ t/año ($8-10 \cdot 10^6$ m³/año)
- Años 60 siglo XX (antes de presas): $12 \cdot 10^6$ t/año ($4,8 \cdot 10^6$ m³/año)
- Después años 60 (hasta actualidad): $0,5 \cdot 10^6$ t/año ($0,2 \cdot 10^6$ m³/año)



CEDEX

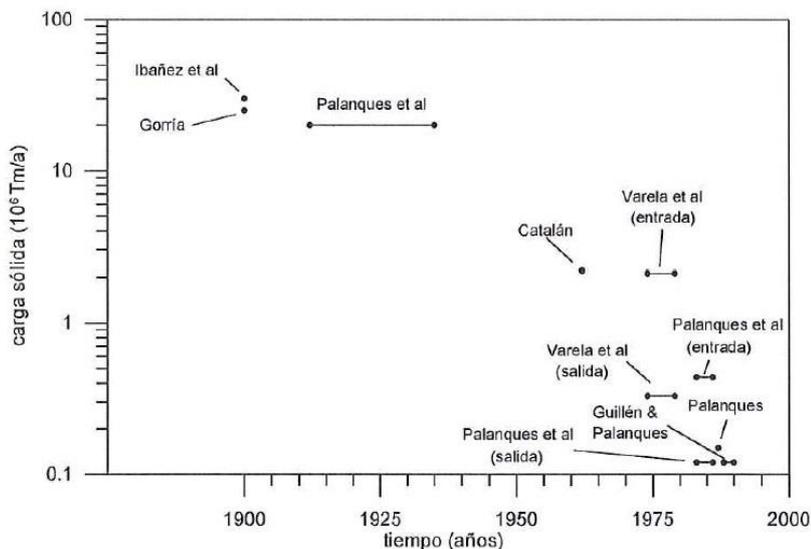


Figura 2.100: Aporte de sólidos del río al mar según diferentes autores (Fuente: Berga y Berga, 2017)

La subsidencia indican se encontraría entre 2 y 3 mm/año

El siguiente capítulo 10 está dedicado al estudio de la inundación que se produce por lo temporales. Para ello siguen los trabajos de LIM y los mapas de inundación del CEDEX; no introduciendo ninguna nueva novedad respecto a los trabajos anteriores.

2.1.7.3 Impactos del cambio climático. Subida del nivel del mar

Realizan una disertación inicial de las variables que provocan el cambio climático y las proyecciones de subida del nivel del mar y lo observado con los datos del pasado (Figura 2.101).

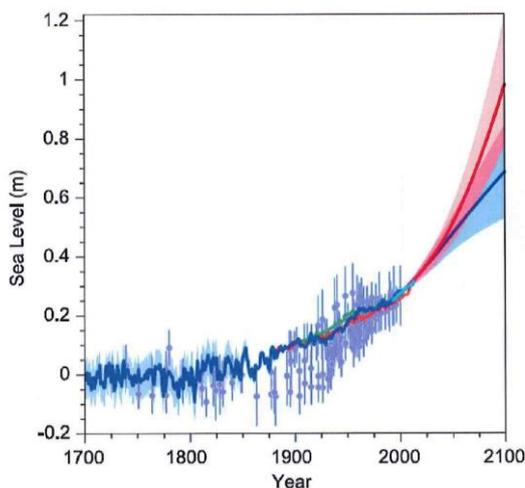
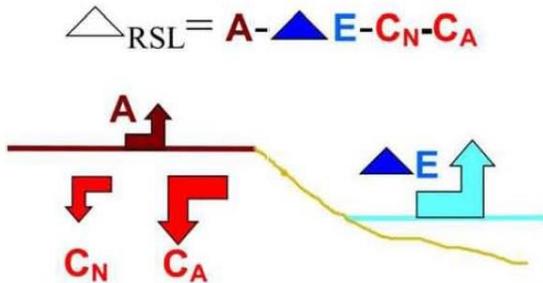


Figura 2.101: Subidas del nivel del mar observadas y previstas desde el siglo XVIII hasta 2100, en un escenario conservador (RCP2.6, azul) y alto (RCP8.5, rojo) autores (Fuente: Berga y Berga, 2017)

El análisis del efecto de la subida del nivel del mar sobre el Delta lo realiza utilizando la expresión que se muestra en la Figura 2.102.

$$\triangle_{RSL} = A - \triangle E - C_N - C_A$$


Donde:

\triangle_{RSL} = SUBIDA RELATIVA DEL NIVEL DEL MAR (SRNM)
A=ACRECIÓN
C_N= SUBSIDENCIA NATURAL
C_A= SUBSIDENCIA ANTROPOGENICA
 $\triangle E$ = SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR (SNM)

Figura 2.102: Expresión de la subida relativa del nivel del mar en el Delta (Fuente: Berga y Berga, 2017)

Tras ello, clasifican los deltas del mundo según el riesgo debido a la subida del nivel del mar en cinco categorías (Sin riesgo, reducido, alto, en peligro, y grave peligro); no sitúan en ninguno de ellos el del Ebro, aunque por los datos se infiere que estaría en la última de las categorías (grave peligro).

Después de tratar de la vulnerabilidad de los deltas del mundo y mediterráneos, se ocupan del Delta de Ebro y los impactos sobre los diversos agentes; naturales y humanos.

El capítulo 12, “Síntesis de la problemática del delta del Ebro”, lo dedican a realizar un resumen de los puntos más importantes del estudio.

En el capítulo 13, “Adaptación a los impactos debidos al cambio climático en las zonas costeras y en los deltas”, hacen un recorrido de los diferentes proyectos existentes en el mundo, Holanda, Italia, etc., con el fin de avalar y justificar sus propuestas de actuación sobre el Delta del Ebro.

El capítulo 14, “Propuesta de actuaciones para la adaptación al cambio climático en el ámbito del delta”, lo dedican para la ampliación de las propuestas indicadas anteriormente. Se basan en las soluciones dadas en otros deltas como el Po o Ródano.

2.1.8 “Accions per al clima al Delta de l’Ebre (ACDE)-Diagnosi” [“Acciones por el clima del Delta del Ebro-Diagnóstico”]; Oficina Catalana del Canvi Climatic (2017).

Se enmarca dentro del “Pla d’Acció Climàtica del Delta de l’Ebre (PACDE)” de GENCAT. Es un estudio monográfico de los efectos del cambio climático sobre el Delta del Ebro. Formalmente está estructurado en tres capítulos que se resumen a continuación.

2.1.8.1 Contexto físico, natural y socioeconómico

El primero de ellos se dedica a la descripción del entorno del Delta; centrado en tres aspectos: Físico, natural y socioeconómico.



Desde el aspecto físico presenta tres grandes aportaciones: La primera de ellas es una síntesis de los elementos físicos que componen el territorio, sintetizado en una tabla (Figura 2.103).

Element geomorfològic	Nom	Longitud / Perímetre (km)	Superfície (Ha)
Delta	Delta de l'Ebre	58,42	29.753,24
Fletxes litorals	Punta del Fangar	13,8	489,9
	Punta de la Banya	41,74	2.664,69
Badies	El Fangar	31,73	2.430,31
	Els Alfacs	59,89	6.994,93
Estuari	Desembocadura	16,27	400,67
Platges	Arenal	1,98	4,18
	Fangar	7,39	480,06
	Goleró	1,13	0,62
	Marquesa	1,77	12,67
	Bassa de l'Arena	3,1	14,5
	Riumar	3,45	59,75
	Sant Antoni	1,93	14,97
	Buda	4,66	107,16
	Alfacada	2,77	55,8
	Serrallo	1,81	72,65
	Platjola	1,31	56,65
	Eucaliptus	2,68	77,42
	Aluet	1,95	29,94
	Trabucador	20,39	561,01
	Sistemes dunars	Platja del Fangar	
Platja de la Marquesa			8,34
Platja de la Bassa de l'Arena			7,82
Platja del Trabucador			336
Altres			204,47
Llacunes	Les Olles	2,4	27,8
	Canal Vell	8,68	245,46
	Garxal	6,04	205,72
	Calaixos de Buda	12,13	507,09
	Alfacada	3,94	65,86
	Platjola	5	50,14
	Tancada	9,11	238,8
	Encanyissada	22,68	782,4

Taula 1. Elements geomorfològics i estructurals. Font: OCCC. Estudi de base n1. Delta de l'Ebre (2008)

Figura 2.103: Elementos geomorfológicos que componen el Delta del Ebro (Fuente: OCCC, 2017)

El estudio hidrogeológico se centra en el descenso de los aportes sólidos que indican se ha ido produciendo en los últimos 100 años; para ello cita algunos de los trabajos que han evaluado esta carga sólida del río que sintetizan en una tabla (Figura 2.104), donde se han observado algunos errores de identificación de la fuente y año de publicación.

Any	Capacitat (hm ³)	Aportació sediments (t/any)	Font
1877	0	30.000.000	Gorria, 1877
1944	720	22.000.000	--
1961	3.450	2.200.000	Català, 1969
1982	6.240	320.000	Varela et al., 1986
1986	6.280	150.000	Palanques, 1987
1987	6.280	130.000	Muñoz, 1990
1990	6.280	120.000	Guillén et al., 1992
2000	7.000	100.000	PHN 2000
2015*	7.833	84.000	PHE 2015-2021 / Rovira et al., 2015

Taula 2. Dades històriques de capacitat dels embassaments de la conca i de l'aportació de sediments al tram baix de l'Ebre. Font: OCCC. Estudi de base n1. Delta de l'Ebre (2008)
 * Pla Hidrològic de l'Ebre 2015-2021 / Rovira et al., 2015

Figura 2.104: Aportes sólidos del río Ebro al mar desde 1877 hasta 2015 (Fuente: OCCC, 2017)

También dicen que la práctica totalidad de la llanura deltaica del Ebro es susceptible de ser inundada en determinados episodios de inundación fluvial, con periodos de retorno de 10 y 50 años, según la Agencia Catalana del Agua (ACA) (Figura 2.105).

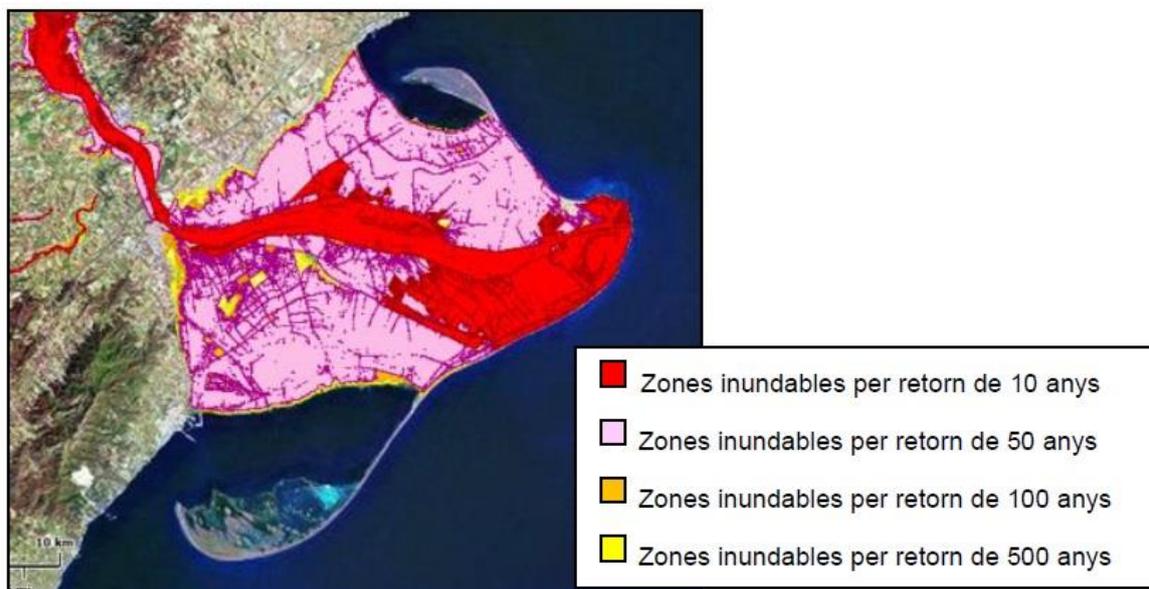


Figura 1. Zonas inundables al Delta de l'Ebre. Font: ACA. Visor d'espais fluvials

Figura 2.105: Zonas de la llanura deltaica del Ebro de ser susceptibles de inundarse según el periodo de retorno (Fuente: OCCC, 2017)

Respecto al medio natural, este estudio indica que ocupa solamente el 20% de la superficie deltaica; siendo utilizada en su gran mayoría por explotaciones agrícolas (Figura 2.106).

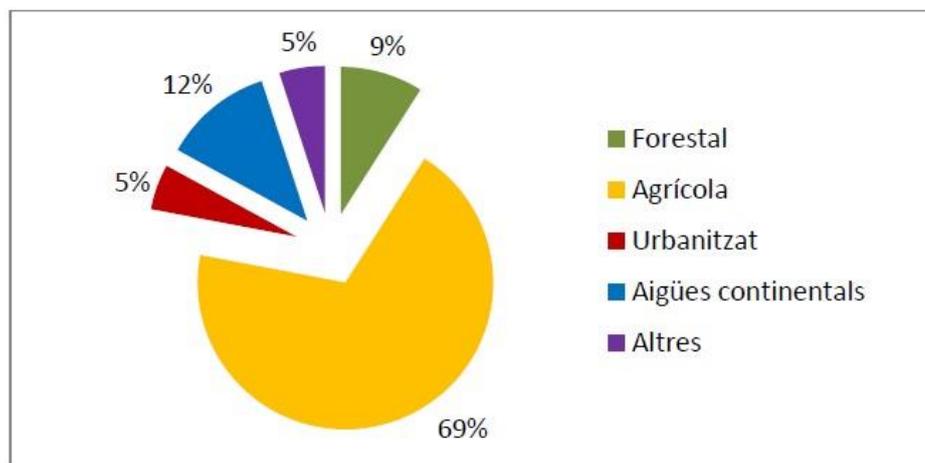


Figura 2.106: Distribución superficial de usos de la llanura deltaica del Ebro (Fuente: OCCC, 2017)

E indican: “A nivel internacional, el Delta del Ebro se incluye en la lista de humedales de importancia internacional por la convención RAMSAR, integra espacios incluidos en la red Natura 2000 como zonas especiales de conservación (ZEC) y zonas de especial protección para las aves (ZEPA), integra zonas de especial interés para la conservación de la vegetación halófila y zonas de importancia europea para la conservación de la vegetación acuática, forma parte de la Reserva de la Biosfera Tierras del Ebro (declarada por la UNESCO el 28 de mayo de 2013) e integra hasta 20 hábitats de interés comunitario según el Anexo I de la Directiva 92/43 / CEE, de hábitats.

A nivel nacional, integra espacios incluidos en el Plan de Espacios de Interés Natural (PEIN) y en los Espacios Naturales de Protección Especial bajo las figuras de Parque Natural, Reserva Natural Parcial y Reserva Natural de Fauna Salvaje. Todo el Delta está catalogado como Área de interés faunístico y florístico.”

En el contexto socioeconómico, este trabajo trata de: la población y sus actividades; la actividad agrícola de la que ocupa el 65% de la superficie del Delta los arrozales; la pesca, de la que solamente existe centro de explotación en la llanura deltaica en Deltebre; la acuicultura y salinas; el turismo; actividad industrial; infraestructuras; etc.

2.1.8.2 Clima y cambio climático en el Delta del Ebro

El segundo capítulo se dedica al cambio climático en el contexto del Delta. Primeramente estudian la evolución reciente de las variables climáticas: temperatura, lluvia, insolación, etc.

Posteriormente, hacen unas proyecciones climáticas de temperatura, precipitaciones, etc. por cada decenio desde 2012 hasta 2050.

A continuación analizan los recursos hídricos y proyecciones hidrológicas. Y seguidamente tratan de la temperatura y del nivel de mar; en el que muestran una serie de datos tomados en el Estarrit que indican una subida del nivel del mar en el periodo 1990-2016 de 3,5 cm/decenio (Figura 2.107).

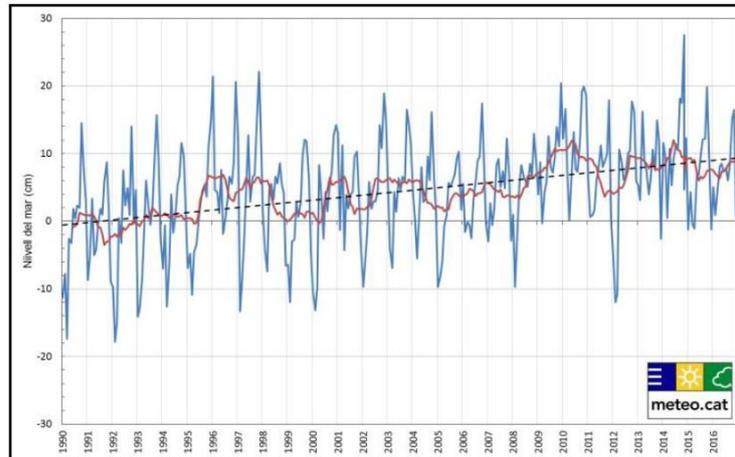


Figura 2.107: Evolución media mensual del nivel del mar en el Estarrit en el periodo 1990-2016
(Fuente: OCCC, 2017)

A continuación, muestran unas simulaciones de inundación del Delta del Ebro (Figura 2.108); en dos estadios de tiempo 2050 y 2100 y en dos hipótesis de aportes del río: con el aporte de sedimentos actual y con el aporte de sedimentos prevista en el proyecto Life.

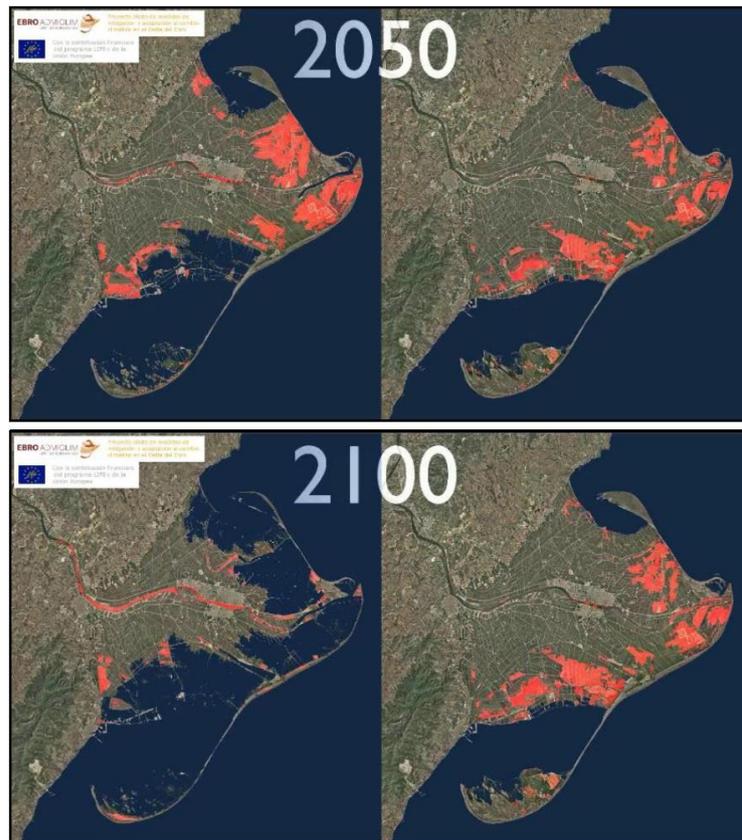


Figura 2.108: Simulación de inundación del Delta del Ebro. A la izquierda con los aportes actuales y a la derecha con la previsión de aportes Las zonas en rojo corresponden a áreas ya por debajo del nivel del mar por la subsidencia, pero aún no inundadas por no estar conectadas con el mar.
(Fuente: Life Ebro Admiclim y OCCC, 2017)

Seguidamente, estudian los sistemas costeros y de dinámica litoral desde la perspectiva del cambio climático; identifican las zonas de acumulación y erosión y la tasa de retroceso de las playas más significativas (Figuras 2.109 y 2.110).

Retrocés mig total de la costa (m)	Escenari A	Escenari B	Escenari C
	any horitzó 2050 $\Delta\eta = 0.15$ m	any horitzó 2100 $\Delta\eta = 0.40$ m	any horitzó 2100 $\Delta\eta = 1.00$ m
Península del Fangar	-339.40	-729.57	-693.98
Platja de la Marquesa	20.49	49.47	90.47
Platja de Riumar i Cap Tortosa	204.56	447.54	488.13
Platja del Serrallo i Platja Migjorn	-111.11	-235.43	-196.64
Platja dels Eucaliptus	-67.93	-142.36	-106.18
Platja el Trabucador	16.30	39.84	76.32
Salines de la Trinitat	157.66	345.70	383.05
Punta de la Banya	-244.98	-525.90	-494.50

Figura 2.109: Retroceso medio de diferentes lugares de la costa del Delta para diversas subidas del nivel del mar (Fuente: OCCC, 2017)



Figura 2.110: Zonas de acumulación y retroceso de la costa del Delta (Fuente: OCCC, 2017)

Indican que una de las consecuencias de la dinámica litoral será el cierre de la boca de la bahía del Fangar; previendo una reducción de su anchura hasta 140 m en 2050.

A continuación tratan del medio marino y sus ecosistemas; de los ecosistemas acuáticos continentales: las lagunas; de los ecosistemas terrestres; de los arrozales; y de la emisión de gases de efecto invernadero en el Delta del Ebro

2.1.8.3 Principales vulnerabilidades del Delta del Ebro

Siguen el esquema general de adaptación al cambio climático (Figura 2.111).

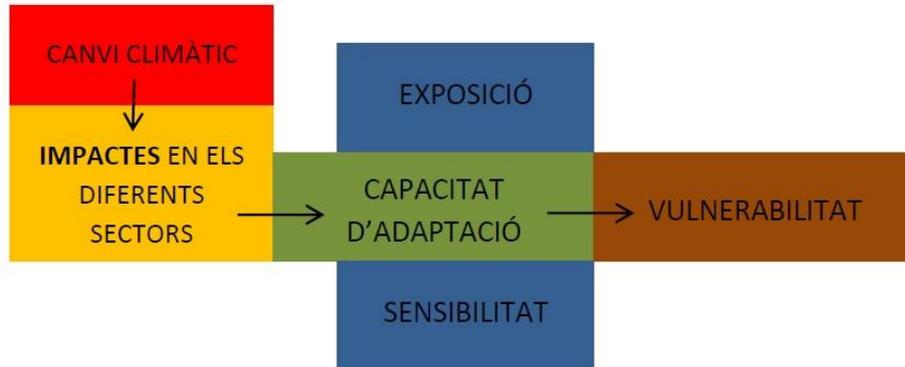


Figura 2.111: Esquema general para identificar la vulnerabilidad en el Delta del Ebro (Fuente: OCCC, 2017)

E indican [traducción del catalán]: “A finales de 2016, la OCCC y LaVola terminaron el estudio "Análisis del grado de vulnerabilidad y resiliencia de los municipios de Cataluña al cambio climático". Los resultados de este informe muestran un índice de vulnerabilidad del territorio del Delta del Ebro superior a la media para los siguientes riesgos:

- Incremento de las necesidades de riego en la agricultura y ganadería.
- Cambios en los cultivos.
- Mayor riesgo de incendio para la biodiversidad.
- Cambios en el patrón de la demanda turística en la gestión del agua.
- Disminución de la disponibilidad de agua en la gestión del agua.
- Mayor riesgo de incendio en el ámbito de la gestión forestal.
- Cambios en los patrones de demanda energética en el ámbito de la industria, los servicios y el comercio.
- Riesgo de incendio en la movilidad e infraestructuras de transporte.
- Incremento de la mortalidad asociada al calor.
- Empeoramiento del confort climático (acentuación del fenómeno de isla de calor) sobre la salud.
- Cambios en los patrones de demanda energética en el ámbito del sector energético.
- Cambios en el patrón de demanda turística en el turismo.
- Mayor riesgo de incendio que afecte al sector turístico.
- Empeoramiento del confort climático en el ámbito de urbanismo y vivienda.
- Incremento de las necesidades de riego en el urbanismo y la vivienda.

A continuación analizan los riesgos asociados a los sistemas físicos y naturales, que clasifican en tablas, indicando si los riesgos son positivos o negativos. En el contexto de este trabajo deben destacarse los siguientes:

Negativos:

- Subsistencia de la llanura deltaica, acentuada por la reducción del caudal del río, el déficit de aportación sedimentaria, la desecación de zonas húmedas o la sobreexplotación de los acuíferos.
- Falta de transporte de sedimentos por el río Ebro.



- Cambios morfológicos en el litoral: erosión de la línea de costa, resultando tanto del transporte longitudinal de sedimentos como del aumento del nivel del mar. Cierre de las bahías. Disminución y degradación de las playas.
- Deseccación de zonas húmedas y colmatación de lagunas litorales.
- Pérdida de patrimonio y daños a la propiedad por aumento del nivel del mar.
- Afectación en las zonas urbanas debido al aumento del nivel del mar, la subsidencia y la regresión, especialmente en el núcleo de Riumar.
- Disminución y degradación de las playas por incremento del nivel del mar y mayor frecuencia e intensidad de temporales.
- Afectación a las infraestructuras e instalaciones (viarias, portuarias, de protección de la línea de costa, redes de servicios, etc.) debido al aumento del nivel del mar y la erosión costera, especialmente aquellas situadas en primera línea de costa o bien cercanas a ella.

Positivos:

- Las playas, los sistemas dunares y otros sistemas naturales como las marismas son favorables para la adaptación al aumento del nivel del mar debido a su dinamismo respecto a otros usos del suelo rígidos, particularmente aquellos que suponen superficies construidas, que no presentan capacidad adaptativa. Asimismo, la baja ocupación de la llanura deltaica por núcleos urbanizados e infraestructuras es ventajosa para la adaptación al aumento del nivel del mar

E indican los principales retos identificados en el Delta del Ebro:

- Reducir la vulnerabilidad y asegurar la perdurabilidad tanto del medio físico y natural como del medio socioeconómico que sustenta el Delta: un río de calidad, con más caudal y más sedimentos, como solución troncal, y un modelo de adaptación dinámica a la cambiante morfología de la línea de costa.
- Implicar activamente todos los actores sociales y económicos, y todas las administraciones involucradas, en el desarrollo sostenible del territorio por medio de un proceso transparente y participativo que facilite la mejora en las formas de gobernanza, rehuendo de dogmatismos.
- Conseguir el equilibrio y el consenso necesarios entre los diversos intereses y las diferentes visiones existentes en el Delta: entre sectores productivos (arroceros vs. pescadores / mariscadores), entre diferentes valores (sectores productivos vs. protección de la biodiversidad) y entre diversas visiones (productivista vs. conservacionista).
- Apostar por una base económica que premie la calidad ante la cantidad en todos los sectores productivos: agricultura y pesca de calidad, con más valor económico; sector industrial y de construcción de calidad; turismo sostenible.



2.1.9 “La problemática del delta del Ebro frente a la regresión y a la inundación. Propuestas de actuaciones consensuadas desde el territorio” (2019)

La gran importancia de este documento es que está consensuado por los entes más implicados en el Delta del Ebro. Sus conclusiones son muy interesantes; especialmente en lo referente a la gestión integral e integrada del Delta, de las que pueden resumirse:

- 1- “...se dibuja un plan desde el territorio deltaico para dar respuesta a la regresión costera, la pérdida de calidad de los ecosistemas y las amenazas de eventos climáticos futuros...”.
- 2- “...proporciona beneficios de forma sostenible en las generaciones presentes y futuras...”.
- 3- “Las estrategias e intervenciones al delta del Ebro deben basarse en los principios de una gestión integrada de las zonas costeras...”.
- 4- “...tres premisas generales... Morfología: habría que mantener la morfología actual... Restablecimiento de sedimentos... Otras medidas...”.
- 5- “...Se propone un modelo integrado de defensa del Delta... Este modelo contempla la recuperación de los sedimentos retenidos en los embalses...”.
- 6- “... Se propone llevar a cabo un "Programa de gestión de sedimentos" para recuperar los depósitos sedimentarios retenidos en los embalses...”.

2.2 ACTUACIONES RECIENTES

El inicio de las actuaciones recientes se ha tomado en el año 2010 con la adquisición de una serie de parcelas en la zona de La Marquesa. Las actuaciones más relevantes desde entonces son:

2010- Adquisición de terrenos.

2015- Obras de emergencia para la reparación de daños producidos por los temporales enero y febrero 2015 en diversos cordones dunares y playas de la provincia de Tarragona.

2015- Obras de emergencia daños producidos en marzo 2015 (T.M. de Alcanar, Sant Jaume d'Enveja, Amposta y Deltebre).

2017- Cierre de la barra de la Illa de Buda, actuación de urgencia del Parque Natural

2020- Estabilización del sistema dunar de las playas de Riumar (En ejecución)

2020- Restitución de las barras del Trabucador e Illa de Buda.

2020- Adenda al proyecto de mejora medioambiental en la margen del Delta junto a la Bahía de los Alfaques (T.M. Amposta y Sant Carles de la Rápita) (En preparación)



2.2.1 Adquisición de terrenos (2010)

En el año 2010, la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar adquirió unos terrenos en la zona de la Marquesa, zona norte del Delta. (Figura 2.112).

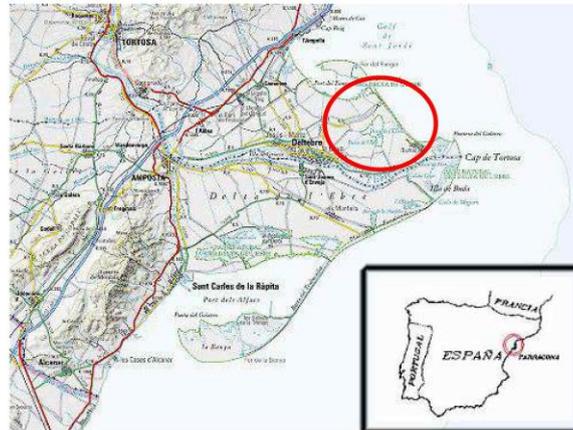


Figura 1.- Plano de situación



Figura 2.- Estado Actual

Figura 3.- Estado Futuro

Figura 2.112: Ficha de localización de los terrenos adquiridos por la DGSCyM en 2010 en el Delta del Ebro (Fuente: DGCM)

2.2.2 **Obras de emergencia para la reparación de daños producidos por los temporales enero y febrero 2015 en diversos cordones dunares y playas de la provincia de Tarragona (2015)**

A finales de enero, febrero y marzo de 2015 se produjeron sucesivamente una serie de temporales (Figura 2.113) frente a las costas del Delta del Ebro; siendo de especial relevancia los producidos el 1 de febrero, Hs=3,86m, y el 20 de marzo, Hs=4,11m. Esta sucesiva cadena de temporales produjo una serie de daños que obligaron a actuar a la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar, con obras de emergencia, entre las que se enmarca ésta.

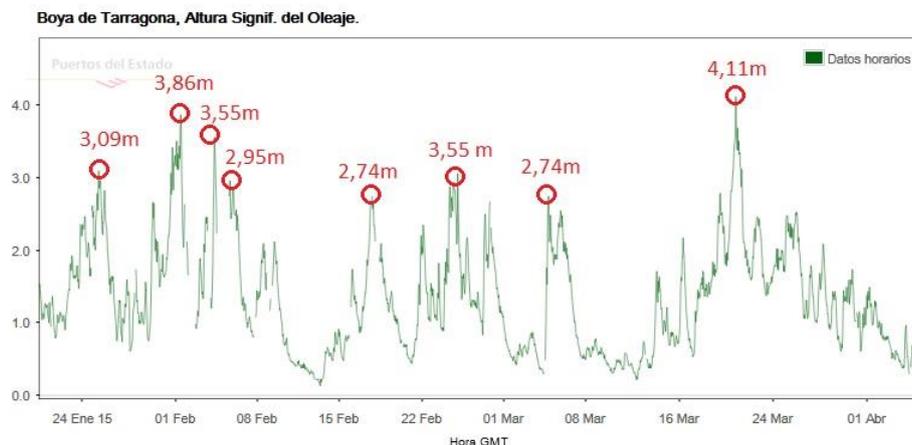


Figura 2.113: Serie temporal de la boya de Tarragona de Puertos del Estado, señalando las puntas de temporal más significativas desde finales de enero hasta comienzos de abril de 2015 (Fuente: Puertos del Estado)

Problemática: Destrucción de sistema dunar y pasarelas de acceso en las playas de La Marquesa y Riumar, en una longitud de 1.800 m, en el término municipal de Deltebre.

Actuaciones: Reposición sistema dunar y pasarelas de acceso en las playas de La Marquesa y Riumar (Deltebre), mediante aportación de arena marina en dunas, empalizadas de fijación dunas y pasarelas de acceso a las playas, en una longitud de 1.800 m.



Figura 2.114: Obras en la playa de Riumar en 2015 (Foto: DGCM)



Figura 2.115: Obras en la playa de la Marquesa en 2015 (Foto: DGCM)

2.2.3 Obras de emergencia daños producidos en marzo 2015 (T.M. de Alcanar, Sant Jaume d'Enveja, Amposta y Deltebre). (2015)

Problemática: Los temporales de marzo de 2015, provocaron daños en la costa de Tarragona que pueden resumirse en el deterioro de paso superior sobre canal de desagüe, en una longitud de 10 m, en el término municipal de Deltebre, y en zonas interiores de la desembocadura en Amposta y Sant Jaume d'Enveja.

Actuaciones: Reconstrucción de paso superior sobre canal de desagüe, en el término municipal de Deltebre, mediante la aportación de 240 t de escollera de 1 a 2 t, en una longitud de 10 m.



Figura 2.116: Reconstrucción de paso superior sobre canal de desagüe, en el término municipal de Deltebre (Después de las obras) en 2015 (Foto: DGCM)

2.2.4 Estabilización del sistema dunar de las playas de Riumar (Próxima ejecución, 2020)

La zona de actuación se sitúa en el hemidelta norte del Ebro (Figura 2.117) donde, parece que los efectos del cambio climático son más acusados. Se enmarca dentro del Plan de Impulso al Medio Ambiente (PIMA ADAPTA COSTAS), cuyo fin es contribuir al desarrollo del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático y la puesta en marcha de la Estrategia de Adaptación de la Costa Española al Cambio Climático. A tal fin se prevé y mitigar los efectos del cambio climático, se ha iniciado un plan para aplicar medidas a nivel provincial del PIMA ADAPTA. En la actualidad se encuentra en fase de “próxima ejecución”.

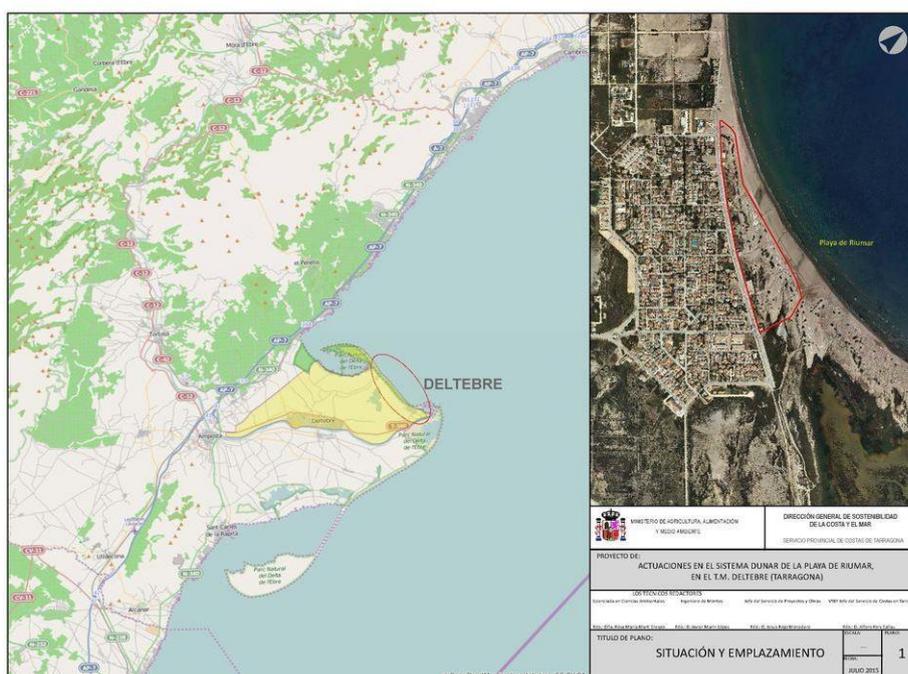


Figura 2.117: Situación y emplazamiento de la actuación prevista (Fuente: MITERD)

El objetivo principal de la actuación es promover la acción coordinada y coherente en la lucha contra los efectos del cambio climático. Se sitúa en la zona oeste de la desembocadura del río en la zona de Riumar.

La actuación contempla las siguientes acciones (Figura 2.118):

- Sustitución de postes de madera y cuerdas que delimitan las pasarelas existentes.
- Reparación de las actuales pasarelas de acceso a la playa.
- Adecuación de un acceso a la cresta de la duna, donde se instalará un mirador.
- Fijación duna mediante un sistema de empalizada realizada con material biodegradable y plantación con especies propias de ecosistemas dunares.

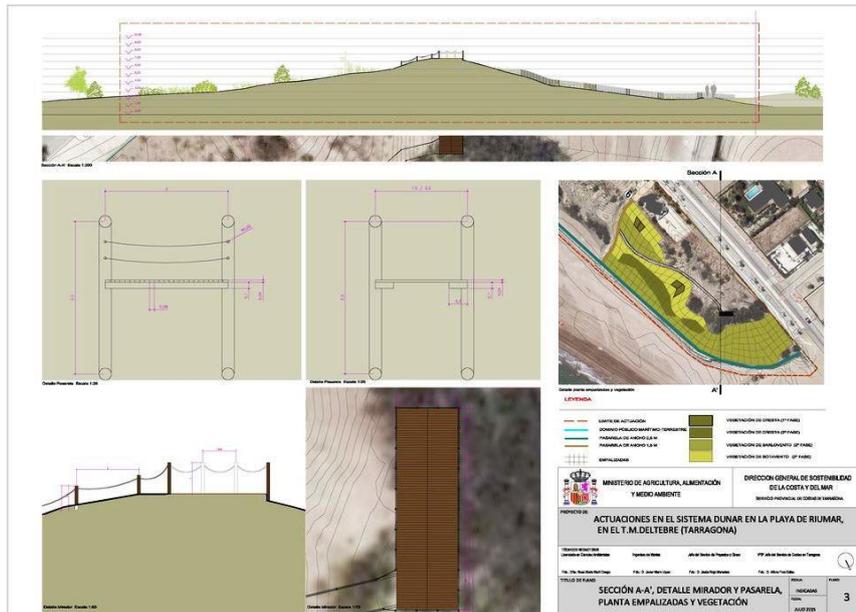


Figura 2.118: Actuaciones del proyecto previsto en la zona de Riumar (Fuente: MITERD)

2.2.5 Obras de emergencia con motivo de los temporales de enero de 2020

Los efectos de los temporales sobre determinadas zonas del Delta del Ebro se transforman en eventos con consecuencias de rotura de barras, penetración del oleaje en la llanura deltaica, etc. cuando se une a ello una marea meteorológica importante. Ello se ha producido en diversos momentos de la historia reciente del Delta, como el acaecido en octubre de 1990 (Jiménez et al., 1990; Sánchez-Arcilla et al., 1997) (Figuras 1.8 y 1.9), o el que se produjo entre el 10 y 15 de noviembre de 2001, también con la rotura de la barra del Trabucador, o la más reciente del temporal del mes de enero de 2017 que rompió la barra de la Illa de Buda y unió el mar con los Caixos (Figura 2.119) abriendo un canal de unos 100 m de ancho y 80 cm de profundidad.



Figura 2.119: Rotura de la barra de la Illa de Buda en enero de 2017 (Fuente: Borrador de Trabajo de Consenso 2019)

Pero en este caso solamente se produjo por el fuerte oleaje (Figura 2.120), sin existir una elevación importante del nivel del mar que se mantuvo en el entorno de 40 cm, según el mareógrafo de Tarragona.

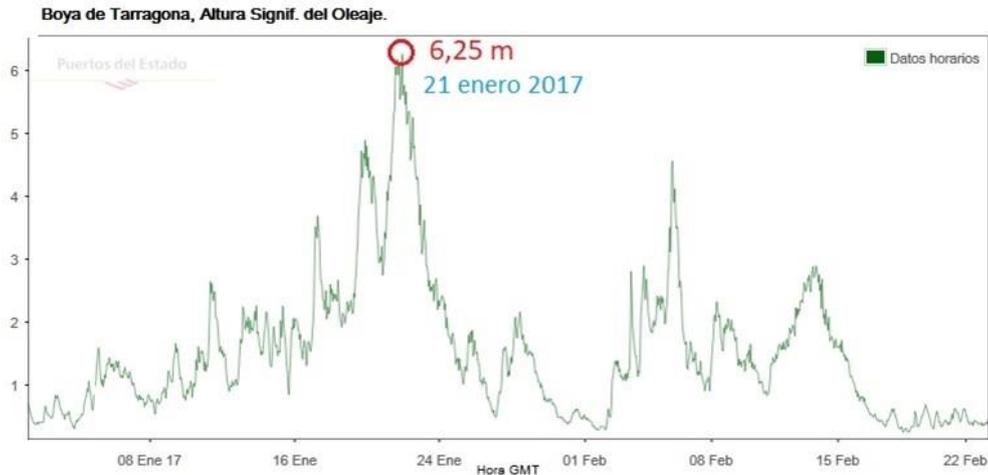


Figura 2.120: Serie temporal de la boya de Tarragona de Puertos del Estado, desde enero hasta finales de febrero de 2017 (Fuente: Puertos del Estado)

Y el más recientes en 2020: El del 21 de enero de 2020, que se unió el gran temporal de $H_{s_{max}}=7,62$ m (Figura 2.121) a una subida del nivel del mar importante (Figura 2.122).

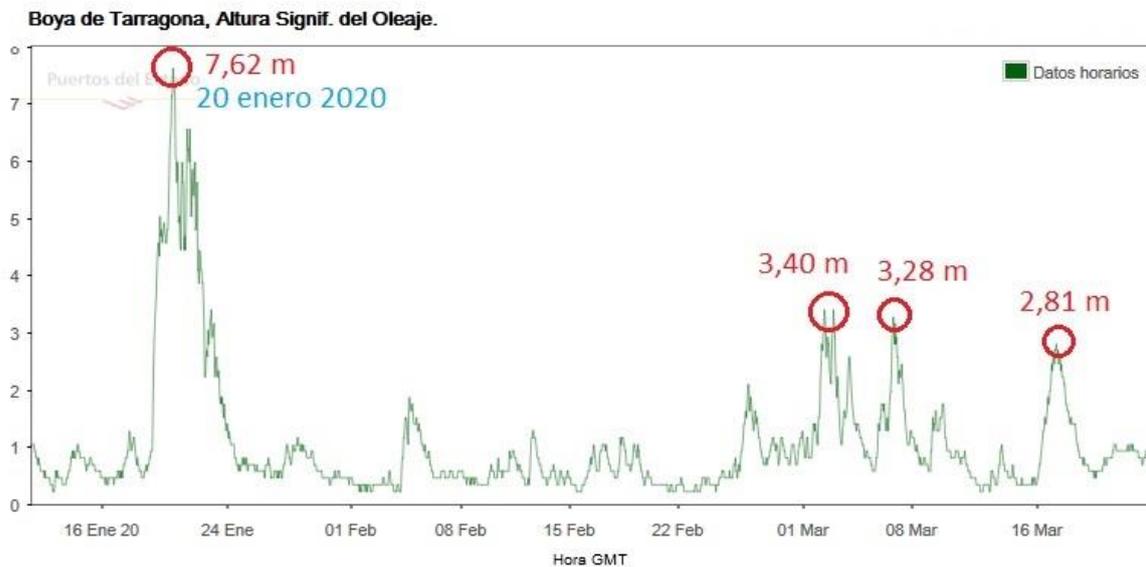
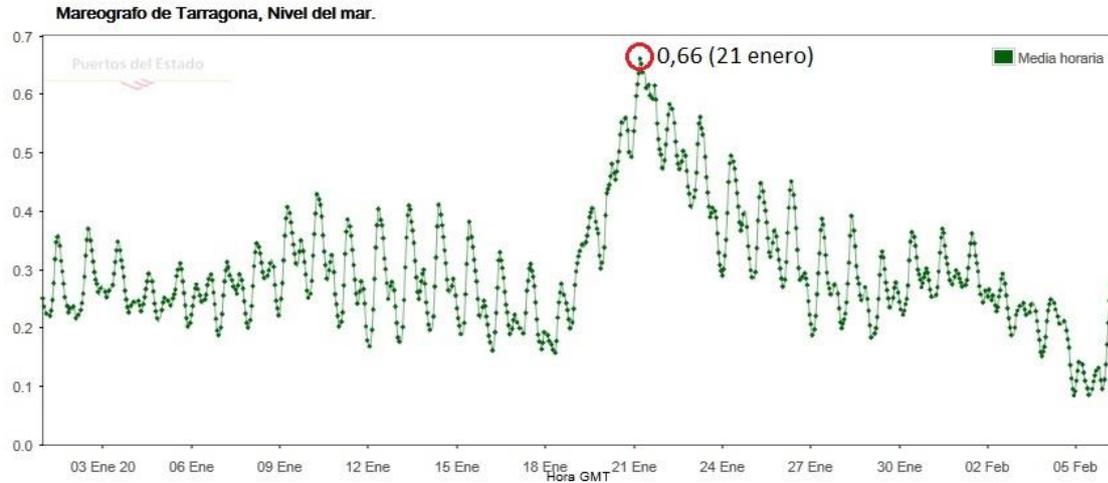


Figura 2.121: Serie temporal de la boya de Tarragona de Puertos del Estado, desde enero hasta finales de marzo de 2020 (Fuente: Puertos del Estado)



(*) Los datos están referidos al cero de redmar (0.099 m por debajo del cero Hidrográfico)

Figura 2.122: Serie temporal del mareógrafo de Tarragona de enero de 2020 (Fuente: Puertos del Estado)

Las consecuencias fue la rotura de las barras de la Illa de Buda y Trabucador que unido al temporal de lluvia inundó una parte importante de la planicie deltaica (Fotos 2.123 a 2.125).



Figura 2.123: Barra del Trabucador e Illa de Buda el 20 de febrero de 2020, ya realizada la unión de la barra para el tránsito hacia las Salinas (Foto: MITERD)



Figura 2.124: Aspecto de la inundación de la planicie deltaica junto a la Isla de Buda en el Delta del Ebro tras el temporal de enero de 2020 (Foto: MITERD)



Figura 2.125: Detalle de la rotura de la barra del Trabucador tras el temporal de enero de 2020 (Foto: MITERD)



Con esta situación, la Dirección General de la Costa y del Mar tuvo que actuar de urgencia para restablecer las comunicaciones y cerrar los huecos que el temporal había dejado en las barras (Figura 2.126), si bien las defensas provisionales no evitaron que se rompiera a mediados de marzo de 2020 (Figura 2.127).



Figura 2.126: Obras de cerramiento de la barra del trabucador en febrero de 2020 (Foto: MITERD)



Figura 2.127: Nueva rotura de la barra del Trabucador en marzo de 2020 (Foto: MITERD)



3 CARACTERIZACIÓN DEL RÉGIMEN SEDIMENTARIO EN EL AMBITO DEL DELTA DE EBRO

3.1 INTRODUCCIÓN

A comienzos de 2020 la Dirección General de la Costa y el Mar (DGCM) y la Dirección General del Agua (DGA) establecieron una Mesa Técnica para el Delta del Ebro con objeto de realizar un diagnóstico de su problemática y sentar las líneas estratégicas de acción para el mismo. Esta Mesa técnica tuvo una primera reunión a finales de febrero en la que participaron, además de la DGA y la DGCM, el CEDEX y la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). En dicha reunión cada organización presentó su experiencia en la gestión del Delta y se identificaron una serie de estudios y trabajos a desarrollar para la mejora del conocimiento sobre la problemática del Delta del Ebro.

En este contexto, la Dirección General del Agua, la Confederación Hidrográfica del Ebro y el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX han realizado una serie de estudios técnicos durante el año 2020 que han quedado integrados en el documento “Plan de actuación para la mejora de la gestión del régimen sedimentario en el ámbito del Delta del Ebro” (enero 2021) que resume el estado del conocimiento en materia de dinámica sedimentaria del río Ebro, así como las líneas de actuación futuras para la mejora de su gestión y que pretende ser un punto de partida para lograr una acción coordinada entre todas las administraciones y los agentes implicados para lograr una mejora del tránsito sedimentario del río Ebro y de los aportes de sedimentos al Delta del Ebro.

De los estudios técnicos mencionados en el párrafo anterior cabe destacar la Nota Técnica “Caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Mequinenza y Ribarroja y en el curso bajo del río Ebro” (mayo 2020) elaborada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, de la que se ha preparado un resumen en este Informe.

Todos estos trabajos sirven como una actualización muy importantes de trabajos anteriores realizados por el Centro de Estudios Hidrográficos, citado en informes del Centro de Estudios de Puertos y Costas ambos del CEDEX del 1995 y 1996, cuyos datos se utilizan y sus fuentes se citan muy especialmente en los capítulos 4 y 6 al tratar de las fuentes de sedimento y tipos de actuaciones.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SEDIMENTOS EXISTENTES EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA Y RIBARROJA Y EN EL CURSO BAJO DEL RÍO EBRO

La Nota técnica, “Caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Mequinenza y Ribarroja y en el curso bajo del río Ebro (mayo 2020)” elaborada por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, se estructura en 9 capítulos a los que acompaña un anejo; siendo los propios del cuerpo del trabajo técnico:

Capítulo 2: Evolución histórica del transporte del sedimento en el tramo bajo del río Ebro. Revisión de la documentación técnica.

Capítulo 3: Caracterización del sedimento del embalse de Mequinenza.

Capítulo 4: Caracterización del sedimento del embalse de Ribarroja.

Capítulo 5: Revisión de datos de aforo sólido realizados por el CEDEX.



Capítulo 6: Influencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja en la dinámica sedimentaria del curso bajo del río Ebro.

Capítulo 7: Estudios complementarios.

ANEXO 1 Apartado 1.8.4 “Aportes sólidos en el Delta” del informe “El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro”. CEDEX (2002)

El resto de los capítulos se dedica a la Introducción, Conclusiones y Referencias técnicas.

3.2.1 Evolución histórica del transporte del sedimento en el tramo bajo del río Ebro

En el capítulo 2 se incluye un listado de los principales estudios desarrollados para caracterizar los sedimentos, siendo éstos:

- 1 Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-octubre de 1970 (CEDEX, 1971)
- 2 Plan Indicativo de Usos del Dominio Público Litoral del Delta del Ebro (Dirección General de Costas, 1978)
- 3 Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (CEDEX, 1982)
- 4 El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro (CEDEX, 2002; inédito)
- 5 Balanç de sediment del tram final del riu Ebre (ACA, 2009)
- 6 Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja (Flumen, 2009). Este estudio incluye una batimetría de Ribarroja realizada en 2007
- 7 Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2011)
- 8 Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008 (Tragsatec, 2012). Este estudio incluye una batimetría del embalse de Mequinenza realizada por la empresa EcoHydros en 2008
- 9 Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza (Control de Obra Civil, 2012)
- 10 Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del Tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix (Universidad Politécnica de Madrid, 2018)

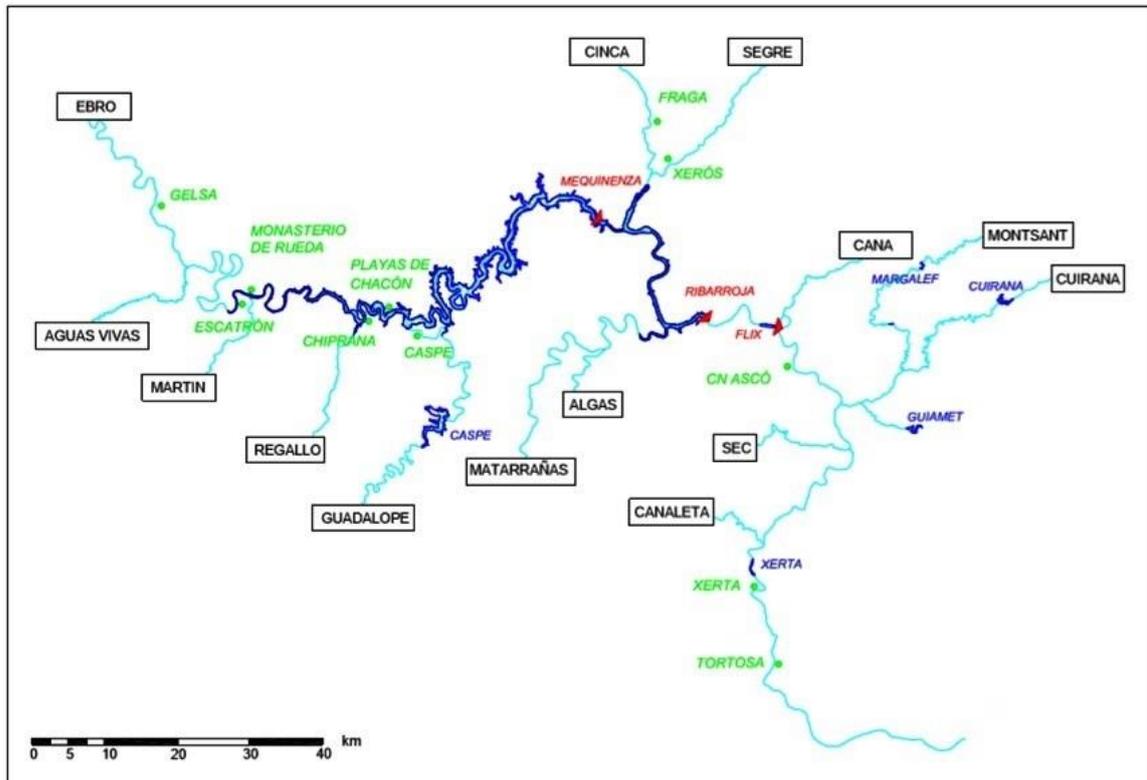


Figura 3.1. Esquema de la zona de estudio del río Ebro. Incluye indicaciones de los principales afluentes y embalses.

Después de hacer un minucioso resumen de los puntos más importantes de los trabajos anteriormente reseñados, concluye el capítulo 2 diciendo: “El transporte de sedimentos aguas abajo de los embalses se ha reducido considerablemente. Palanques (1987) lo sitúa en torno a 0,15 Mt/año en la desembocadura, en el período 1983-86. Guillén (1992) obtuvo en el período 1988-89, 0,12 Mt/año. Tena (2012) con mediciones de sonda de turbidez obtuvo una tasa de 0,17 Mt/año para el período 1998-2008, tasa que se reduce a 0,066 Mt/año para el período 2008-2012, según Tena y Batalla (2013). Hay algunos estudios que incluyen valores algo superiores, de manera que el tránsito sedimentario en el curso bajo del Ebro podría acotarse en la actualidad, de acuerdo con diferentes autores, en una horquilla que iría de 0,15 a 0,50 Mt/año.”

3.2.2 Caracterización del sedimento del embalse de Mequinenza

A este ítem se dedica el capítulo 3. Según se indica al comienzo del capítulo “La estimación del volumen de sedimentos en la actualidad en el embalse se ha realizado por dos procedimientos (extrapolando la tendencia de las tasas anuales de sedimentación obtenidas en la cola del embalse anteriores a 2012 y mediante una correlación del régimen hidrológico) y se ha calculado tanto el volumen total de sedimentos depositado en el embalse, como el acumulado en los 42 km de su cola”. Para ello se utilizó diversa documentación de topobatemétrica; tanto histórica como de finalización de obra del año 2102.

Primeramente se hizo un recálculo del volumen total del vaso de la presa: Dando un volumen de 1483,29 hm³, frente a los 1530 hm³ anteriormente supuestos. Para la realización del



seguimiento del embalse se toman 51 perfiles transversales su eje desde las cercanías de la presa T1 cuyas distancias se muestran en la Tabla 3.1.

Se realizó una estimación del volumen del sedimento acumulado en el embalse hasta 1982, en dos etapas: 1966-1982 t 1972-1982 (Figura 3.2 y Tabla 3.1)

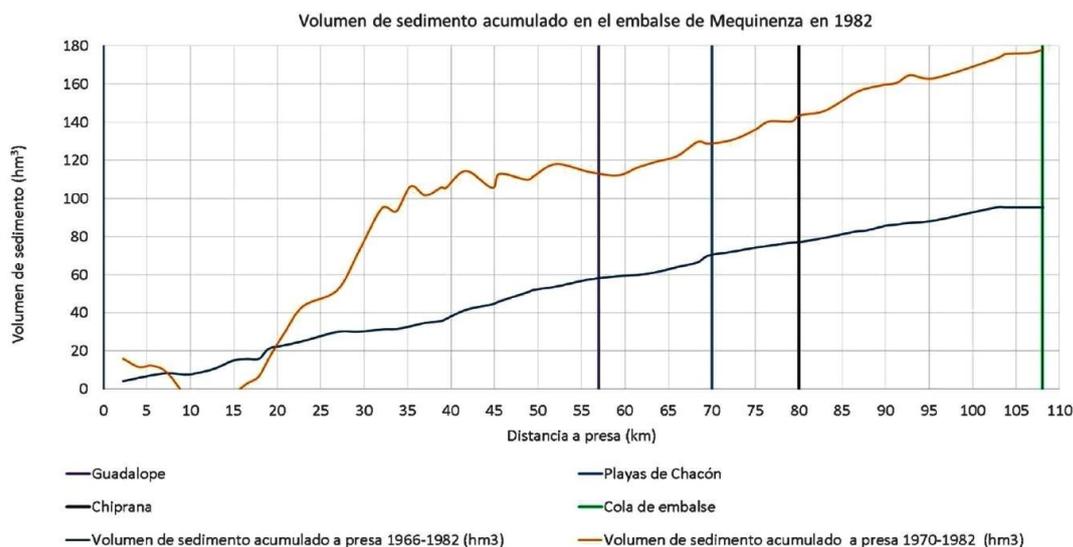


Figura 3.2: Volumen de sedimento acumulado con origen en la presa de Mequinenza (1982) (Fuente: CEH-CEDEX)

Tabla 3.1: Tramos, tasas y volúmenes de sedimentación del embalse de Maquinenza (CEH, 2020)						
TRAMO	Distancia acumulada a presa (km)	Tasa de sedimentación anual del tramo 1982-2012 (hm ³)	Volumen de sedimentación del tramo 1982-2012 (hm ³)	Volumen de sedimento acumulado 1982-2012 (hm ³)	Volumen de sedimentación el tramo 1966-2012 (hm ³)	Volumen de sedimento acumulado 1966-2012 (hm ³)
T 1	2.25	0.31	4.95	4.95	9.00	9.00
T 2	4.11	0.14	2.18	7.12	3.96	12.96
T 3	5.56	0.10	1.55	8.68	2.82	15.79
T 4	7.31	0.08	1.32	9.99	2.40	18.19
T 5	9.47	-0.05	-0.78	9.22	-1.42	16.77
T 6	10.63	0.05	0.72	9.94	1.31	18.08
T 7	12.78	0.19	3.03	12.97	5.52	23.60
T 8	14.88	0.32	5.11	18.08	9.29	32.89
T 9	16.41	0.07	1.10	19.18	2.00	34.89
T 10	17.89	0.01	0.16	19.34	0.29	35.18
T 11	19.03	0.41	6.47	25.81	11.77	46.95
T 12	20.86	0.14	2.22	28.03	4.04	50.99
T 13	22.98	0.17	2.67	30.70	4.87	55.86
T 14	26.90	0.37	5.85	36.55	10.64	66.50
T 15/6	29.36	0.01	0.11	36.66	0.20	66.70
T 17	32.04	0.09	1.49	38.15	2.72	69.41
T 18	33.68	0.02	0.24	38.39	0.43	69.85
T 19	35.34	0.11	1.82	40.20	3.30	73.15
T 20	37.05	0.14	2.17	42.37	3.95	77.10
T 21	38.88	0.07	1.16	43.54	2.12	79.21
T 22	39.38	0.08	1.25	44.79	2.28	81.50
T 23	41.70	0.37	5.89	50.68	10.72	92.22

T 24	44.73	0.23	3.58	54.27	6.52	98.74
T 25	45.56	0.12	1.89	56.16	3.44	102.18
T 26	48.69	0.36	5.63	61.79	10.25	112.43
T 27	49.58	0.11	1.77	63.56	3.21	115.65
T 28	52.07	0.13	2.07	65.63	3.77	119.41
T 29	55.86	0.29	4.54	70.17	8.25	127.66
T 30	59.16	0.13	6.73	76.90	8.45	136.11
T 31	61.39	0.05	4.87	81.77	5.53	141.65
T 32	63.41	0.10	3.73	85.50	5.05	146.69
T 33	65.99	0.22	4.96	90.46	7.79	154.48
T 34	68.30	0.19	1.88	92.34	4.33	158.81
T 35	69.64	0.28	1.91	94.25	5.58	164.39
T 36	72.21	0.14	1.96	96.21	3.82	168.21
T 37	74.77	0.16	3.45	99.66	5.52	173.73
T 38	76.59	0.09	3.14	102.80	4.36	178.08
T 39	79.10	0.12	2.45	105.26	4.03	182.11
T 40	80.16	0.03	1.27	106.52	1.62	183.74
T 41	82.96	0.17	2.89	109.41	5.07	188.81
T 42	86.42	0.25	2.60	112.01	5.80	194.61
T 43	87.85	0.06	1.18	113.19	1.90	196.51
T 44	89.78	0.17	0.65	113.84	2.90	199.42
T 45	91.27	0.07	0.83	114.67	1.70	201.12
T 46	92.83	0.06	1.33	116.01	2.17	203.28
T 47	95.53	0.09	0.98	116.98	2.15	205.43
T 48	102.72	0.54	-0.54	116.45	6.44	211.87
T 49	103.77	0.00	0.00	116.45	0.00	211.87
T 50	106.54	0.00	0.00	116.45	0.00	211.87
T 51	108.11	0.00	0.00	116.45	0.00	211.87

A continuación se hace una estimación del volumen de sedimento acumulado hasta 2012 en el embalse (Figura 3.3, Tabla 3.1).

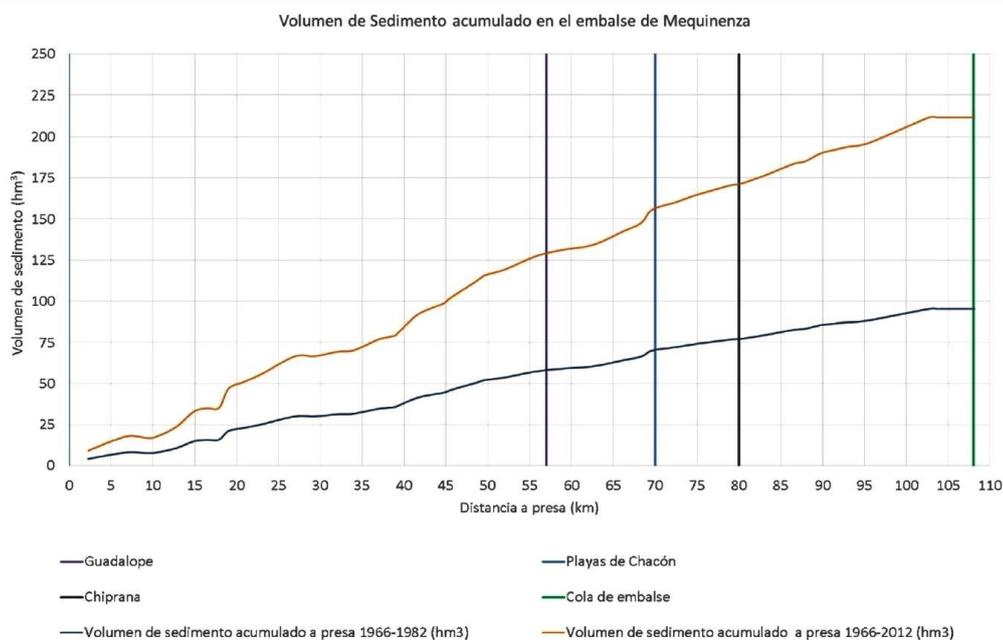


Figura 3.3: Evolución sedimentológica del embalse de Mequinenza en 1982 y 2012 (Fuente: CEH-CEDEX)



El siguiente paso es estimar el volumen de sedimento acumulado en 2020 por ajuste de la tasa de sedimentación, para ello se emplea la misma tasa de sedimentación del periodo anterior; teniendo en cuenta que no había variado el régimen hidrológico de la cuenca desde 2012 (Figura 3.4).

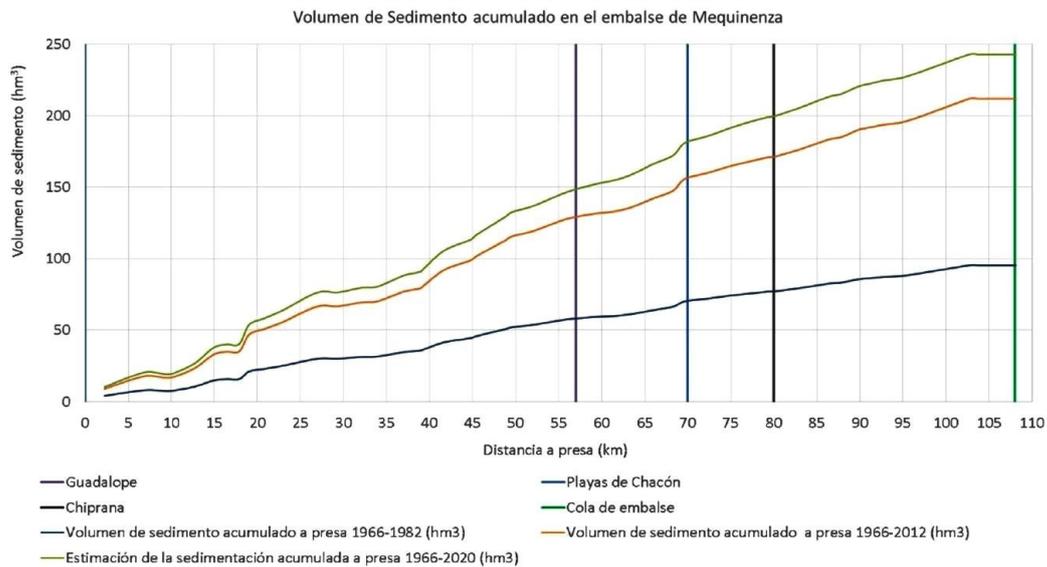


Figura 3.4: Evolución temporal de la sedimentación del embalse de Mequinenza. Valores acumulados con origen en la presa (Fuente: CEH-CEDEX)

A continuación, la estimación del volumen de sedimento acumulado en 2020 se hace mediante ajustes hidrológicos, para ello dispusieron de una serie completa de caudales diarios desde 1966 hasta la actualidad. El método para completarla fue generar una serie de caudales, partiendo de la serie de ellos desaguados y del nivel de embalse realizado por los técnicos del CEH (Figura 3.5).

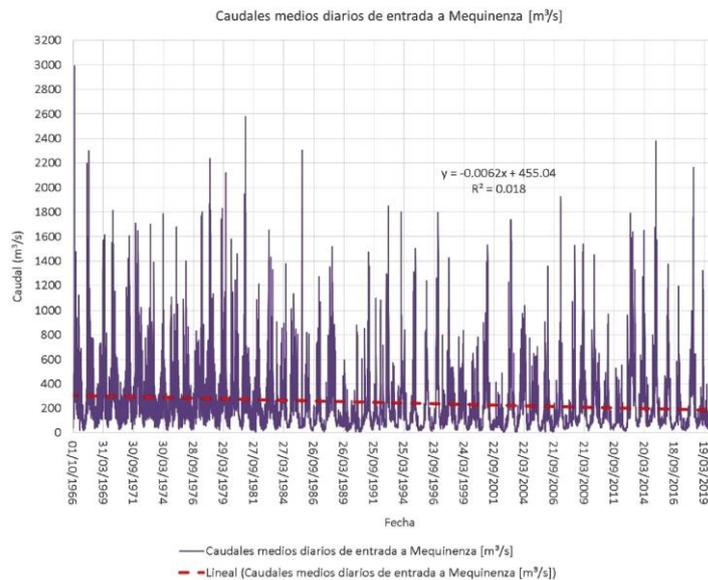


Figura 3.5: Serie histórica de caudales de entrada en el embalse de Mequinenza (Fuente: CEH-CEDEX)

E indica: “Considerando que este embalse retiene la totalidad de sedimento aportado, bien sea por arrastre de fondo o en suspensión, se puede obtener una relación entre caudal líquido y caudal sólido que proporciona un volumen determinado de sedimento aportado al embalse. Tomando como fecha de inicio de las aportaciones, el 01/10/1966, con una relación:”

$$\frac{Q_{sólido}}{Q_{líquido}} = 0,6 \cdot 10^{-3}$$

Aplicando esta relación se obtiene una acumulación de sedimento de 94,5 hm³ hasta 1982; de 207,2 hm³ hasta 2012; y de 244,9 hm³ hasta 2020 (Figura 3.6).

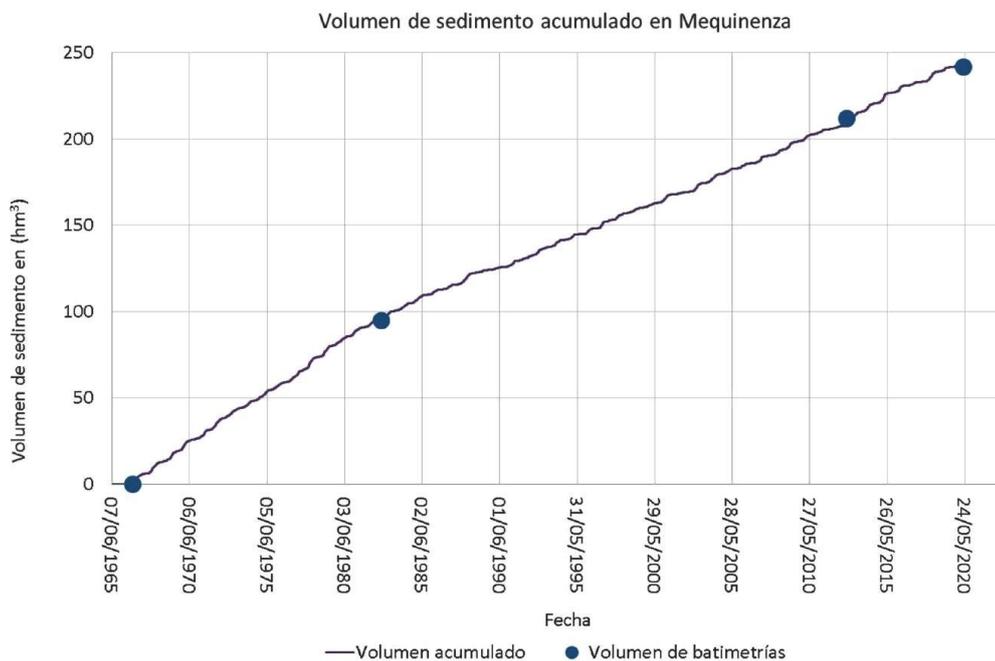


Figura 3.6: Evolución del volumen de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza (Fuente: CEH-CEDEX)

Finalmente se hace un estudio para caracterizar el sedimento de la cola del embalse de Mequinenza. Para ello toman los datos de los entre los tramos 30 y 51, correspondientes a los últimos 42 km del embalse (Figura 3.7). Posteriormente, se caracteriza el sedimento por tamaños utilizando los diez sondeos de la campaña de finalización de obra de 2012, en todos los tramos comprendidos entre el T36 y el 44 (Figura 3.8). Para ajustar los datos de los sondeos a los tramos caracterizados del embalse, supusieron que los repartos por tipos de sedimento eran representativos de todo el tramo y con este principio se obtuvo el reparto de las características granulométricas de los sedimentos entre el tramo 36 y el tramo 44 (Figura 3.9).



PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

Anejo 5. Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro

CEDEX

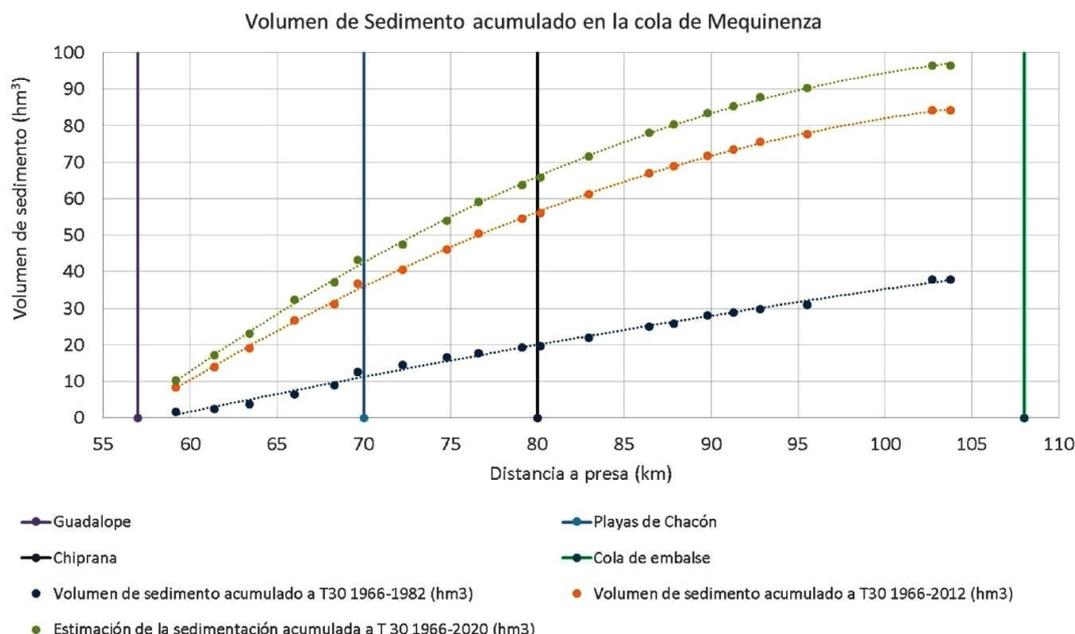


Figura 3.7: Volumen de sedimento acumulado en cola del embalse de Mequinenza (Fuente: CEH-CEDEX)

Tabla 13: Caracterización del sedimento de los sondeos del estudio de Control de Obras de 2012

Sondeo	PK	% gravas	% arena	% limo	% limo arenoso	% arena fangosa	% limo fangoso	% arenisca	% tierra vegetal
10	74	3.7	64.2	0.0	0.0	32.1	0.0	0.0	0.0
9	75	18.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	81.8
8	76	8.7	0.0	45.7	0.0	45.7	0.0	0.0	0.0
7	77	0.0	33.3	0.0	66.7	0.0	0.0	0.0	0.0
6	79	2.2	32.2	33.3	0.0	0.0	32.2	0.0	0.0
5	80	0.0	0.0	33.3	0.0	0.0	33.4	33.3	0.0
4	82	33.4	0.0	0.0	0.0	33.3	0.0	33.3	0.0
3	85	2.0	49.0	0.0	49.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	88	16.8	0.0	2.1	0.0	81.1	0.0	0.0	0.0
1	90	4.8	47.6	0.0	47.6	0.0	0.0	0.0	0.0

Figura 3.8: Tabla que da las características del sedimento obtenido de los 10 sondeos practicados como finalización de obra en 2012 (Fuente: CEH-CEDEX)

Tabla 14: Caracterización del tipo de sedimento por tramo de embalse

Tramo	Dist. a presa (km)	Volumen sedimen. tramo 2020 (hm³)	Sondeo	% grava	% arena	% limo	% limo arenoso	% arena fangosa	% limo fangoso	% arenisca	% tierra vegetal
T 36	72.2	4.34	10	3.7	64.2	0.0	0.0	32.1	0.0	0.0	0.0
T 37	74.8	6.44	9 y 8	13.4	0.0	22.8	0.0	22.8	0.0	0.0	40.9
T 38	76.6	5.19	7	0	33.3	0.0	66.7	0.0	0.0	0.0	0.0
T 39	79.1	4.68	6	2.2	32.2	33.3	0.0	0.0	32.2	0	0.0
T 40	80.2	1.96	5	0.0	0.0	33.3	0.0	0.0	33.4	33.3	0.0
T 41	83.0	5.85	4	33.4	0.0	0.0	0.0	33.3	0.0	33.3	0.0
T 42	86.4	6.49	3	2.0	49.0	0.0	49.0	0.0	0.0	0	0.0
T 43	87.8	2.22	2	16.8	0.0	2.1	0.0	81.1	0.0	0	0.0
T 44	89.8	3.08	1	4.8	47.6	0	47.6	0.0	0.0	0	0.0

Figura 3.9: Tabla que da las características del sedimento obtenido de los 10 sondeos practicados como finalización de obra en 2012 aplicada a los tramos correspondientes del embalse (Fuente: CEH-CEDEX)

Finalmente, en el resumen se indica:

- Volumen de sedimentos acumulados en los 42 km de cola del embalse de Mequinenza estimados en este informe en 2020: 96,55 hm³
- Caracterización del sedimento en la cola del embalse. En el presente informe se calcula que de los 40.2 hm³ de sedimento que se estima que existen entre los PK 72 a 90, 10,67 hm³ serían de arena y 3,73 hm³ de grava

3.2.3 Caracterización del sedimento del embalse de Ribarroja

El estudio de la caracterización y evaluación de los sedimentos depositados en el embalse de Ribarroja se realiza en el capítulo 4, cuyo objetivo es determinar el volumen de sedimento retenido actualmente en 2020 en él. Para ello se ha partido de “estudio batimétrico realizado por del Grupo Flumen en 2007 que acotaba los depósitos sedimentarios en el embalse de Ribarroja entre 13 y 16,6 hm³... esta información es suficiente para estimar la tasa de sedimentación global del embalse, la cual se ha calculado en esta nota técnica mediante una correlación del régimen hidrológico, de manera similar a como se hizo en el apartado 3.5 para el embalse de Mequinenza”.

La serie de caudales diarios se determinó utilizando el anuario de aforos del CEDEX, obteniendo la serie que se muestra en la Figura 3.10.

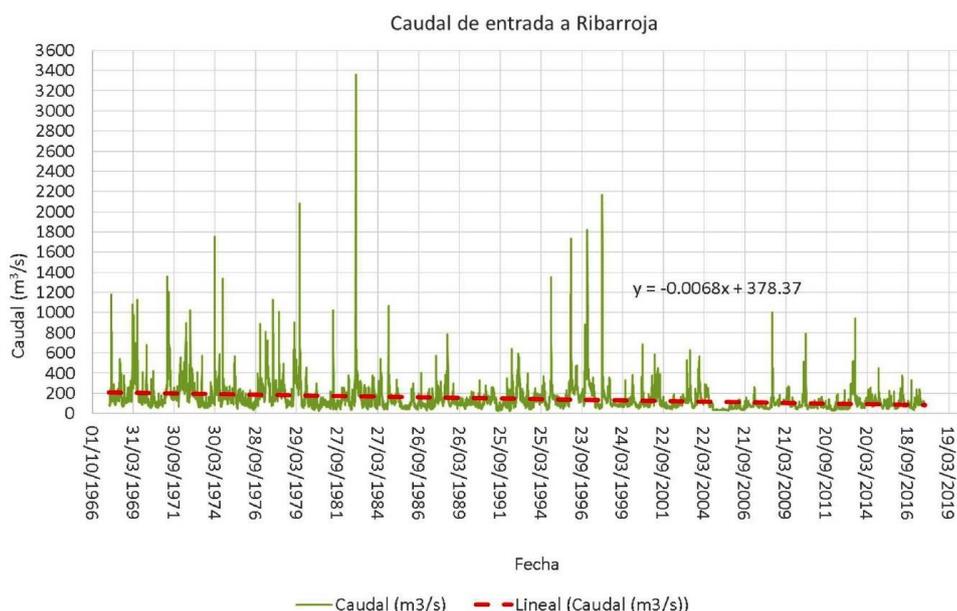


Figura 3.10: Caudales de entrada al embalse de Ribarroja usando el anuario de aforos (Fuente: CEH-CEDEX)

La relación que obtienen entre el caudal sólido y líquido es la siguiente

$$0,65 \cdot 10^{-4} < \frac{Q_{sólido}}{Q_{líquido}} < 0,832 \cdot 10^{-4}$$



Cuya horquilla se muestra en la Figura 3.11.

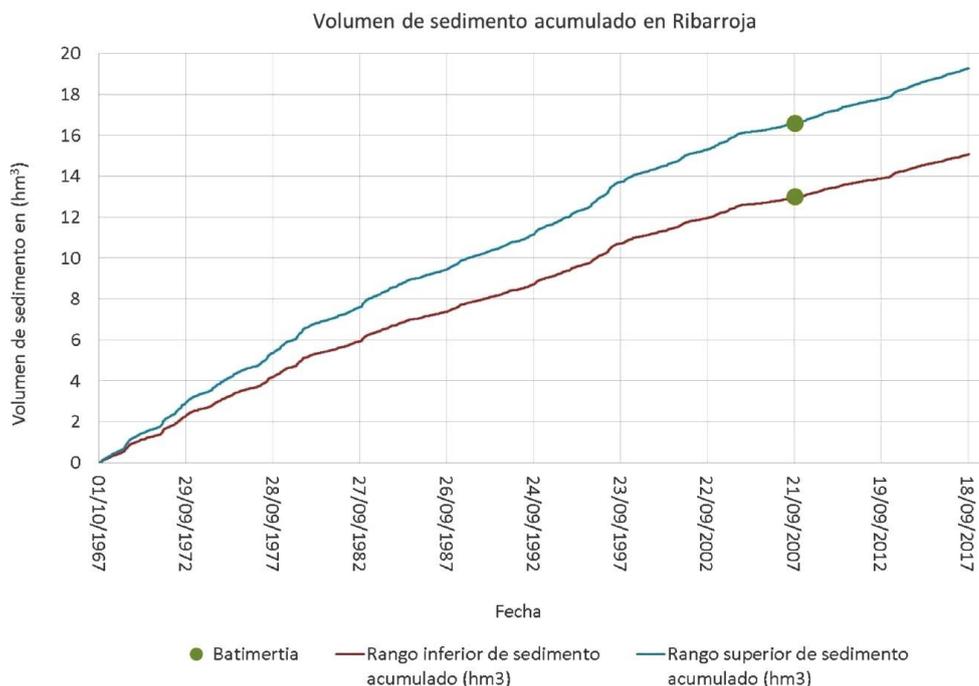


Figura 3.11: Horquilla del sedimento acumulado en el embalse de Ribarroja (Fuente: CEH-CEDEX)

Y se concluye diciendo: “Por tanto, considerando un porcentaje de retención de sedimento del 40% (Flumen, 2009) en la entrada se Ribarroja el aporte de sedimento fue de 1,35 Mt/año, valor que coincide con el estudio inédito del CEDEX (2002).”

Desafortunadamente, no se dispone de datos que puedan caracterizar por tamaños los sedimentos acumulados en Ribarroja.

3.2.4 Revisión de los datos de aforo sólido realizados por el CEDEX

El objetivo de este capítulo 5 es utilizando la información de los aforos sólidos realizados ellas, y efectuando una serie de ajustes llegar a las tasas de aporte de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Para ello, de las estaciones de aforo de sólidos (Figura 3.12), se eligió las seis más representativas (Figura 3.13) y de cada una de ellas se obtuvo la relación entre el caudal sólido y líquido. Finalmente, obtienen una tasa anual de transporte de sedimento.

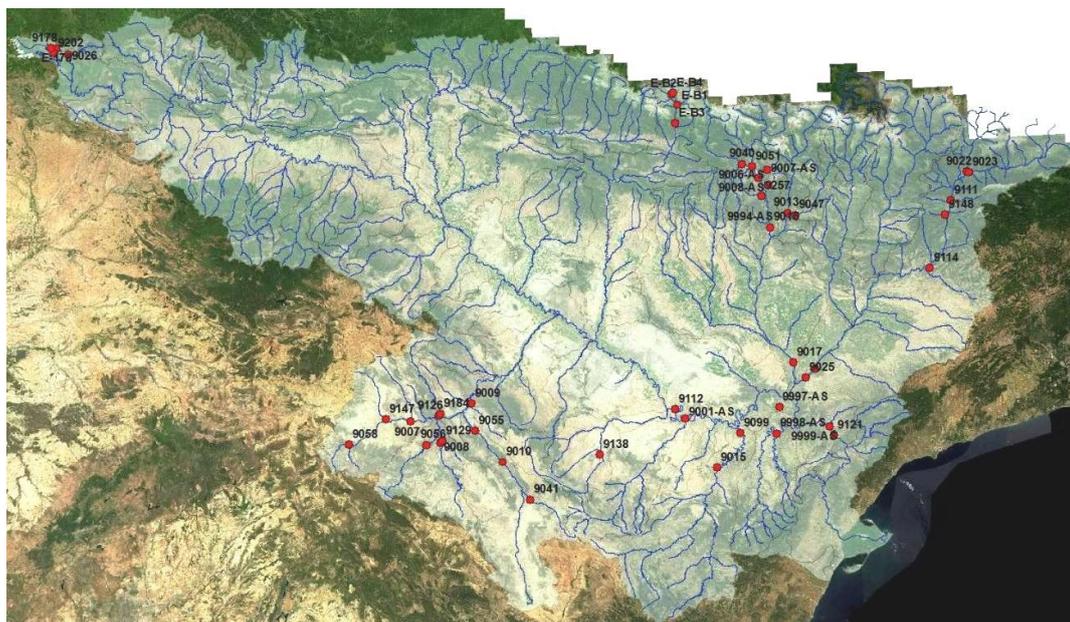


Figura 3.12: Estaciones de aforos sólidos en la cuenca del río Ebro (Fuente: CEH-CEDEX)

Tabla 16: Estaciones de aforo sólido analizadas.

Margen	Código estación	Río	Localidad	Periodo de medida
derecha	9001-AS	Martín	Escatrón	1987-1990
derecha	9099	Guadalope	Caspe	1988-1990
izquierda	9017	Cinca	Fraga	1975-1990
izquierda	9025	Segre	Seros	1980-1989
izquierda	9112	Ebro	Gelsa	1986-1990
izquierda	9121	Ebro	Flix	1988

Figura 3.13: Estaciones de aforo sólido y periodo analizado de ellas (Fuente: CEH-CEDEX)

Llegando a las siguientes conclusiones, que difieren algo de las determinadas por los métodos anteriores (capítulos 2 y 3 de esta Nota Técnica):

- La tasa anual de aporte de sedimento al embalse de Mequinenza que, para el período 1986-1990, resulta de $4,87 \cdot 10^6$ t/año de sólidos medidos, de los cuales $0,54 \cdot 10^6$ t/año serían de sólidos en suspensión.
- La tasa de aportación media anual de sólidos de Ribarroja medidos es de $2,44 \cdot 10^6$ t/año y $0,33 \cdot 10^6$ t/año de sólidos en suspensión.

3.2.5 Influencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja en la dinámica sedimentaria del curso bajo del río Ebro

Una vez analizada la capacidad de retención de sedimentos de los dos grandes embalses de la cuenca del río Ebro, el capítulo 6 de esta Nota Técnica se dedica a estudiar el efecto



de ellos en la dinámica sedimentaria del río; para ello se analiza la tasas de transporte de sedimento en el curso bajo del Ebro sin embalses y con embalses.

Para determinar la tasa sedimentaria propia del río sin considerar los efectos retenedores de los embalses, lo que se hace es determinar ésta justo antes de cada uno de ellos y con ello se obtiene una relación entre el caudal sólido y líquido, por lo que conociendo el caudal del río Ebro se puede obtener la capacidad de caudal sólido que hubiera tenido si no hubieran existido los embalses. El resultado se muestra en dos gráficas (Figuras 1.14 y 3.15) en las que cada una de ellas corresponde: al análisis de las series iniciales, hasta 1981, donde el caudal es mayor; y a las series finales desde 1986, donde el caudal sólido es menor que el caudal medio del período global.

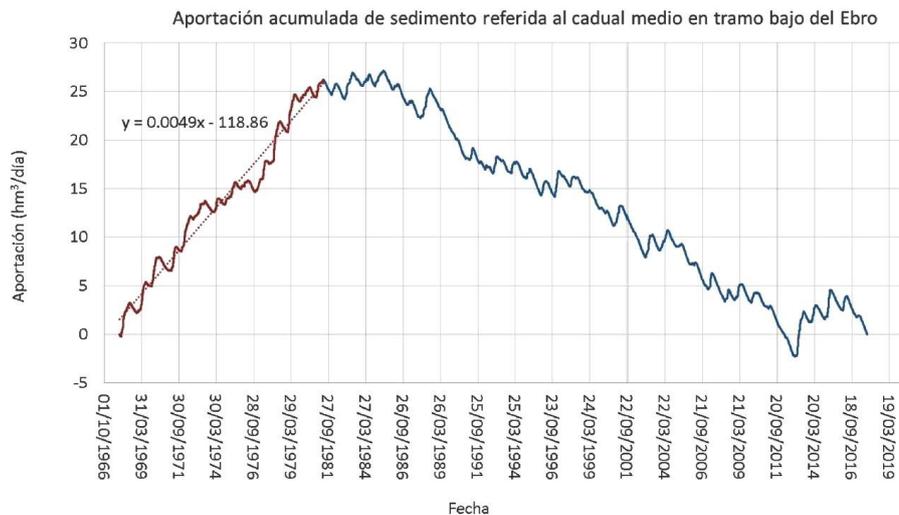


Figura 3.14: Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario sin embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1967-1981 (Fuente: CEH-CEDEX)

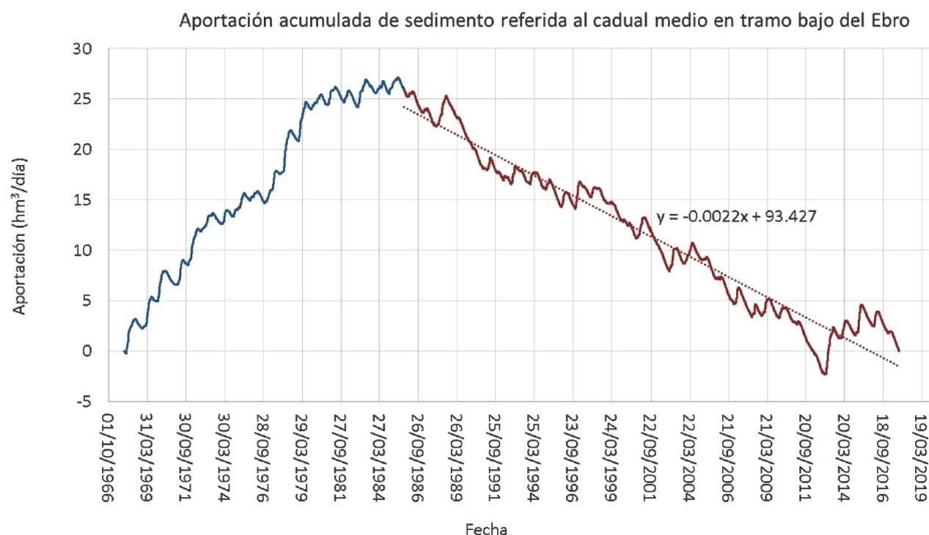


Figura 3.15: Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario sin embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1986-2016 (Fuente: CEH-CEDEX)

Finalmente, se concluye que: “En caso de no existir embalses, en la actualidad el tramo bajo del río Ebro transportaría 5.16 Mt/año, más los aportes menores de las cuencas del tramo bajo.”

Para estudiar la tasa de transporte de sedimento en el curso bajo del Ebro con embalses en la actualidad, se parte de dos hipótesis: La presa de Mequinenza retiene todo el caudal sólido; y la presa de Ribarroja retiene todo el transporte de fondo y el 60% de las aportaciones conjuntas de sedimento en suspensión de los ríos Cinca y Segre. El análisis realizado da como resultado que los caudales sólidos medios del río Ebro en los dos periodos considerados son los que se muestran en la Figura 3.16.

Período	Caudal sólido medio (m ³ /día)	Tasa volumétrica (hm ³ /año)	Tasa de transporte (Mt/año)
1967-1981	0.0020	0.7342	0.8270
1986-2016	0.0009	0.3327	0.3747

Figura 3.16: Tasas de transporte de sedimento en el curso bajo con embalses (Fuente: CEH-CEDEX)

Al igual que en el caso del análisis si embalses, el resultado se muestra en dos gráficas (Figuras 3.17 y 3.18) en las que cada una de ellas corresponde: al análisis de las series iniciales, hasta 1981, donde el caudal es creciente; y a las series finales desde 1986, donde el caudal sólido es decreciente.



Figura 3.17: Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario con embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1967-1981 (Fuente: CEH-CEDEX)



CEDEX



Figura 3.18: Aportaciones acumuladas de sedimento referidas al caudal medio del curso bajo del río Ebro. Escenario con embalses. Ajuste del caudal sólido medio del periodo 1986-2016 (Fuente: CEH-CEDEX)

Para finalizar, esta Nota Técnica hace tres propuestas para que se pueda ahondar en el conocimiento de los sedimentos que retienen estos embalses, siendo éstas:

1. La realización de un estudio batimétrico completo del embalse de Mequinenza, permitiría comprobar el volumen real de sedimento retenido en el embalse, y además determinar las tasas de transporte reales de la cuenca del Ebro, aguas arriba de Mequinenza.
2. Un nuevo estudio batimétrico de Ribarroja permitiría actualizar la sedimentación del embalse y ajustar las tasas de transporte.
3. Se carece de estudios sedimentológicos de los embalses de Mequinenza y Ribarroja, que permitan caracterizar con precisión los sedimentos retenidos.

3.2.6 Conclusiones sobre la retención de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja

Entre las conclusiones a las que se llega en la Nota Técnica, son de especial interés para este Plan las siguientes:

Embalse de Mequinenza

- 1- Las grandes dimensiones del embalse de Mequinenza, 108 km de longitud y 1.483,29 hm³ de capacidad, lo convierten en una barrera que retiene la totalidad del sedimento que llega al embalse por arrastre de fondo y en suspensión.



- 2- Las tasas de aportación de sedimentos al embalse de Mequinenza se estiman en este informe en $6,68 \cdot 10^6$ t/año en el periodo de 1966 a 1982 y en $4,37 \cdot 10^6$ t/año entre 1982 y 2012.
- 3- La actual tasa de sedimentación del embalse de Mequinenza se estima en $4,36 \cdot 10^6$ t/año, equivalente a $3,87 \text{ hm}^3/\text{año}$.
- 4- Los sondeos realizados entre los PK 72 y 90 en 2012 han permitido caracterizar el sedimento en este tramo de embalse. Se calcula que de los $40,2 \text{ hm}^3$ de sedimento que existen en este tramo, $10,67 \text{ hm}^3$ son de arena y $3,73 \text{ hm}^3$ son de grava.

Embalse de Ribarroja

- 1- Los estudios realizados en el presente informe permiten estimar que en la actualidad (2020) la sedimentación de Ribarroja esté entre 15 y $19,3 \text{ hm}^3$.
- 2- Partiendo del valor medio del rango de sedimentación, la tasa de sedimentación anual de los primeros años de explotación fue de $0,55 \cdot 10^6$ t/año, valor que desciende prácticamente a mitad, $0,26 \cdot 10^6$ t/año en el período 2004-2016.
- 3- No se dispone de información sedimentológica que permita caracterizar el sedimento del embalse.

Tránsito de sedimentos en el curso bajo del Ebro

- 1- Respecto al tránsito de sedimento en el curso bajo sin la existencia de Mequinenza y con los cálculos realizados en el presente informe se concluye que, de no existir los embalses de Mequinenza y Ribarroja, la tasa de transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro habría sido de $8,8 \cdot 10^6$ t/año en el período 1967-1982, valor que habría descendido desde 1986 hasta la actualidad a $5,16 \cdot 10^6$ t/año. A estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo
- 2- En el presente informe se estima que en la actualidad (2020) la tasa de transporte de sedimentos en suspensión aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Ribarroja y Flix es de $0,37 \cdot 10^6$ t/año (durante los primeros años tras la puesta en explotación de las presas esta tasa era de $0,83 \cdot 10^6$ t/año). Al igual que en el caso anterior, a estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.



4 DINÁMICA LITORAL

El objetivo final de este capítulo, dedicado a conocer la dinámica litoral imperante en la costa del Delta del Ebro, es conocer cómo se mueve la arena a través del litoral y así determinar el balance sedimentario de este sistema litoral. Para ello lo primero que se estudia es el sedimento, que se va a mover y/o fijar a lo largo de la costa, incluyendo los siguientes estudios: cuánto aporta el río; hacia dónde se desplaza; qué características físicas tiene la arena; dónde se deposita, etc. A continuación, se estudia cómo incide el oleaje en la costa hasta el momento en que incide sobre las playas y hace mover la arena. La velocidad y dirección de ese movimiento se calculan mediante diversas metodologías de la teoría del transporte de sedimentos. Pero, esa arena se mueve, tanto en perfil, como a lo largo de la playa hasta que, por falta de energía de oleaje o por un obstáculo alcance un sumidero de arena y se deposite allí. Una vez conocido ese ciclo de movimiento de arena a lo largo de la costa del Delta, se está en condiciones de conocer un balance de cuánta arena ha salido de un sitio y cuánta se ha depositado en otro. Este estudio puede realizarse a lo largo de un periodo determinado, que será habitualmente un año. Entonces se sabrá cuál es la tendencia morfológica del Delta; esto es, la evolución futura que se espera de ella.

4.1 SEDIMENTOS

Como indica en informe del CEDEX (Peña, 1996); “Debe tenerse en cuenta que este apartado analiza los sedimentos superficiales que forman la franja litoral y plataforma costera continental, en tanto en cuanto afecte a este estudio de dinámica litoral. No adentrándose en estudios sedimentológicos, mineralógicos o de cualquier otro ámbito, así mismo no se entra en el conocimiento sedimentológico de la plataforma deltaica, solamente de su franja costera”.

Para cumplir en objetivo marcado, esto es; la caracterización de las arenas, se ha dividido en cuatro apartados que describen las posibles fuentes u origen de los sedimentos así como la cantidad que aportan, el ámbito e influencia espacial de dichas fuentes, la naturaleza y características más relevantes, desde el punto de vista de la dinámica litoral, del material y su relevancia respecto a ella y los sumideros que captan dicho material. En todos ellos, se analizarán tanto datos de estudios anteriores como datos propios más actuales, si existiesen.

4.1.1 Fuente de sedimento

Antes de entrar a considerar y estudiar la fuente de sedimento, compuesta por el río Ebro y su cuenca, e intentar evaluar los aportes esperables de ella, debe tenerse en cuenta qué tipo de sedimento se está considerando. Muchos estudios lo engloban todos los tamaños de sedimento, pero en realidad, para la estabilidad de la estructura deltaica exterior y la dinámica de sus costas se debe tener en cuenta la fracción de arena (comprendida entre 0,1 y 4,76 mm), por lo que a la hora de evaluar la cantidad de sedimento que aporta el río a la costa solamente debe considerarse ésta y no la fracción más fina (inferior a 0,1 mm) compuesta por limos y arcillas (fango). Ello no quiere decir que esta fracción fina no resulte necesaria para el complejo deltaico; pero no en el aspecto puramente costero, sino más bien como elemento o capa superficial que se deposita sobre la llanura deltaica en un estado natural, cuando ésta se inunda, compensando parcialmente la subsidencia de la unidad (como sucedía históricamente en las famosas inundaciones del Nilo).



En conjunto, el material fino, arcillas y limos, es transportado por suspensión a gran rapidez a lo largo del cauce, siguiendo la estela de la avenida; pero, el material más grueso como las arenas se transportan también mediante arrastre o saltación; ello hace que este movimiento sea lento y no siga la estela de la avenida en su mayor extensión; produciéndose depósitos intermedios que poco a poco pueden llegar al cauce bajo cerca de la desembocadura, pero esta acción puede tardar un tiempo importante; esa es una de las causas que los embalses río arriba retengan especialmente la fracción de fangos, fina, y en menor cantidad, fracción gruesa como arenas y gravas. Ello quiere decir que el río en la actualidad arrastra en una avenida determinada la arena correspondiente al cauce bajo del río; posiblemente no más de unos cuantos kilómetros (CEDEX, 1996). Bien es cierto que la energía cinética está mucho más atenuada debido al freno que suponen los embalses y, por tanto la capacidad de arrastre en el tramo final, que es el aportador principal de arenas, puede haberse reducido.

Por tanto, se debe solamente contabilizar como fuente sedimentaria la arena; por lo que sería más lógico llamarle "fuente de arena", y ésta se va a estudiar siguiendo los tres pasos siguientes:

- 1) Análisis de los estudios anteriores que posea datos que aporten conocimiento de ella
- 2) Aportes del río en el tiempo hasta la actualidad
- 3) Dirección del suministro de los aportes y análisis en el tiempo.

4.1.1.1 Estudios anteriores de arenas aportadas por el río Ebro

Antes de entrar a analizar y describir los estudios anteriores que tratan de los aportes de arena del río Ebro al mar, se debe indicar que no se tratará de todos los estudios ya que algunos de ellos engloban los datos, a veces algo parciales, de otros. Se han considerado los que tienen un análisis más profundo, cara a conocer el verdadero aporte de arena, a menos de manera aproximada.

"PLAN INDICATIVO DE USOS DEL DOMINIO PÚBLICO LITORAL (PROVINCIA DE TARRAGONA)" (PIDU) (MOPU, 1978)

Este es el primero de los estudios de los aportes del río al mar que tiene en consideración el tipo de material y la manera de ser transportado. Es poco citado en la mayoría de estudios sobre el Delta, solamente se halla en los estudios del CEDEX de 1995 y 1996, mientras que el resto se decanta por el uso de estudios algo más simples; no obstante su análisis se considera imprescindible para conocer el modo y comportamiento de los sedimentos aportados por el río Ebro al mar.

Lo primero que hace, es indicar los trabajos pasados que dan datos de los aportes sólidos del río, siendo éstos (en los que se ha transformado las toneladas en m^3 suponiendo una densidad absoluta/peso específico de $2,5 t/m^3$, como valor indicativo):

- Gorría (1880): $25 \cdot 10^6 t/año$ ($10 \cdot 10^6 m^3/año$)
- Carreras i Candi (1936-1940): $17 \cdot 10^6 t/año$ ($6,8 \cdot 10^6 m^3/año$)
- Bayerri (1934) y Deffontaines (1949): $> 10^6 t/año$ ($0,4 \cdot 10^6 m^3/año$)



CEDEX

En su estudio indica que: “Para el caudal medio de $550 \text{ m}^3/\text{seg}$, los arrastres de fondo pueden estimarse en 1.300 toneladas/día, es decir

$$W \approx 0,5 \times 10^5 \text{ toneladas/año}$$

Teniendo en cuenta las crecidas y caudales altos esta cifra podría aumentar a entre $0,7$ y $0,9 \times 10^6$ toneladas/año”. También se presenta la gráfica siguiente donde relaciona la descarga sólida con el caudal líquido (Figura 4.1).

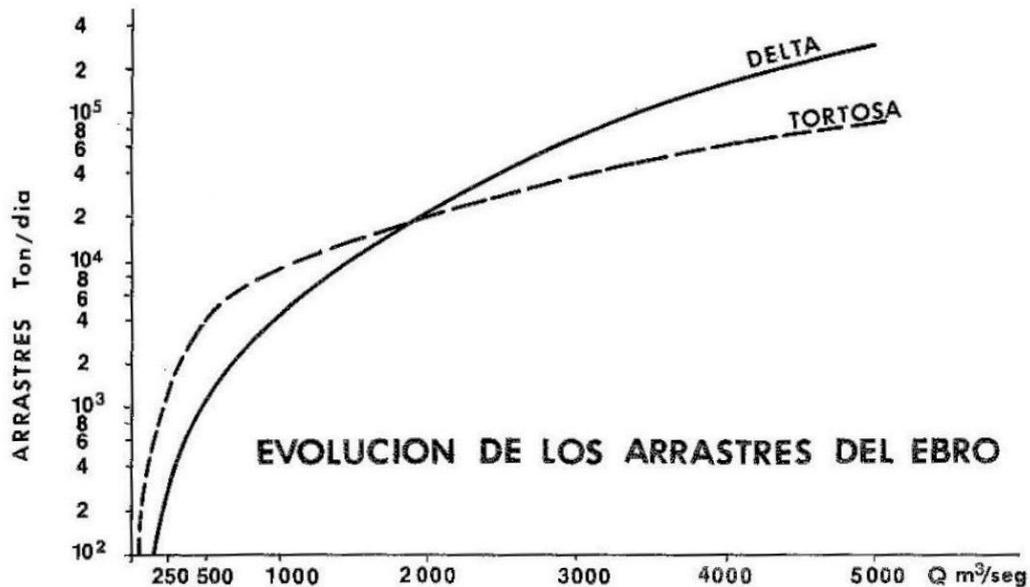
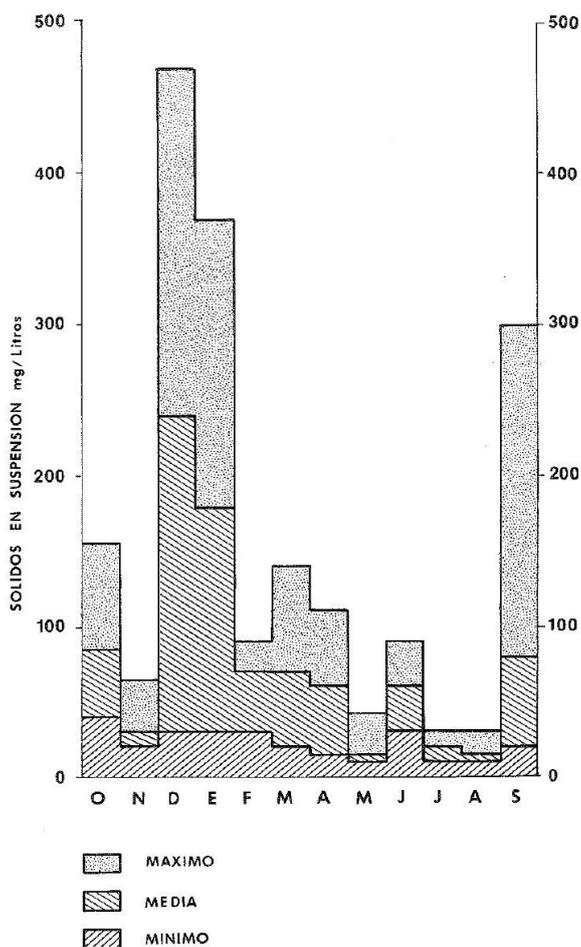


Figura 4.1: Arrastre de sedimento del río Ebro según su caudal en Tortosa y en la desembocadura (Fuente: PIDU, 1978)

La cantidad del volumen de sedimento que se transportaba en suspensión se midió con datos de campo y con ello se obtuvo la gráfica de la Figura 4.2.

“Aplicando estos valores a los caudales mensuales del periodo 1913-1970 se obtiene un transporte sólido en suspensión de”:

- Máximo: $4,7 \cdot 10^6 \text{ t/año}$ ($1,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$) [$1,7 \times$ Medio]
- Medio: $1,5 \cdot 10^6 \text{ t/año}$ ($0,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$)
- Mínimo: $0,2 \cdot 10^6 \text{ t/año}$ ($0,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$) [$0,5 \times$ Medio]



TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN DEL EBRO EN TORTOSA

Figura 4.2: Sólidos en suspensión medidos en Tortosa a lo largo de un año hidrológico (Fuente: PIDU, 1978)

A continuación indica que la reducción tan drástica del sedimento transportado por suspensión responde a las retenciones de los principales embalses aguas arriba del río Ebro cuyas características se indican en la tabla siguiente

Presa	Año de terminación	Capacidad (Hm ³)	Cuenca (km ²)
Mequinenza	1958-66	1.530	57.442
Ribarroja	1969	291	80.183
Flix	1948	11,7	82.416

E indica que la capacidad de retención de sedimentos de los embalses se situaría entre el 85 y 95%, y una retención de casi 23 t/año en los embalses. Finalmente da un resumen de las estimaciones de transporte sólido tanto por fecha como por tipo de transporte (Tabla 4.2).



Periodo (años)	Total (x 10 ⁶)		Arrastre (x 10 ⁶)		Suspensión (x 10 ⁶)	
	t/año	m ³ /año	t/año	m ³ /año	t/año	m ³ /año
1900-1940	23	9,2	1,1	0,4	22	8,8
1960-1980	3,5	1,4	0,5	0,2	0,5	0,2

Por lo que el valor final, los aportes del río Ebro al mar se podría estimar en 0,5 t/año o 0,2 m³/año, que indica podía aumentar en periodos de crecidas o caudales altos hasta 0,28-0,30 m³/año. Suponiendo todo esto el valor aproximado de la arena que el río aporta al mar.

“DINÁMICA Y BALANCE SEDIMENTARIO EN LOS AMBIENTES FLUVIAL Y LITORAL DEL DELTA DEL EBRO” (GUILLÉN, 1992)

Se trata de la tesis doctoral de Jorge Guillén que está dividida en cuatro partes y 18 capítulos. Es muy rica en datos de campo y análisis de ellos (primera parte). La segunda parte se ocupa especialmente del río en su tramo final antes de desembocar al mar. El análisis del sedimento en suspensión a la salida del río (en campaña de toma de datos entre Mayo de 1988 y Mayo de 1991) daba que todos los tamaños eran inferiores a 0,055 mm (Figura 4.3) lo que indicaba que la arena de aporte al mar nunca lo hacía en suspensión.

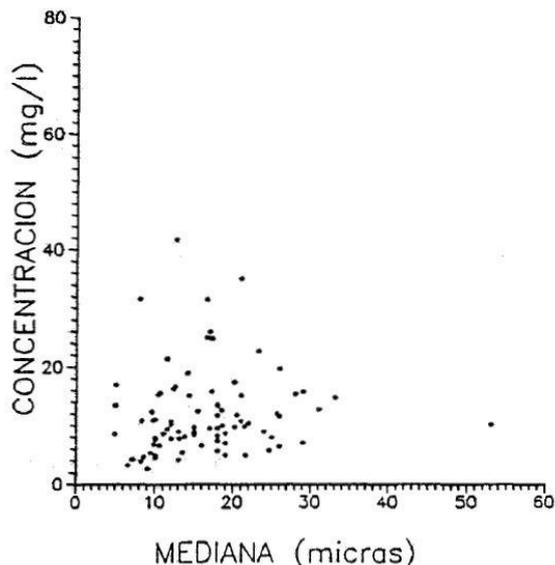


Figura 4.3: Concentración y tamaño del material en suspensión en la salida del río Ebro (Fuente: Guillén, 1992)

E indica que: “El sedimento del lecho del Río Ebro está constituido por partículas de todas las fracciones granulométricas, desde arcillas a gravas [...] Las fracciones arena y fango se extienden por todo el curso del río y su distribución depende fundamentalmente de las condiciones energéticas del régimen fluvial, mientras que las gravas sólo se localizan en las proximidades de Amposta.”. (Figura 4.4).

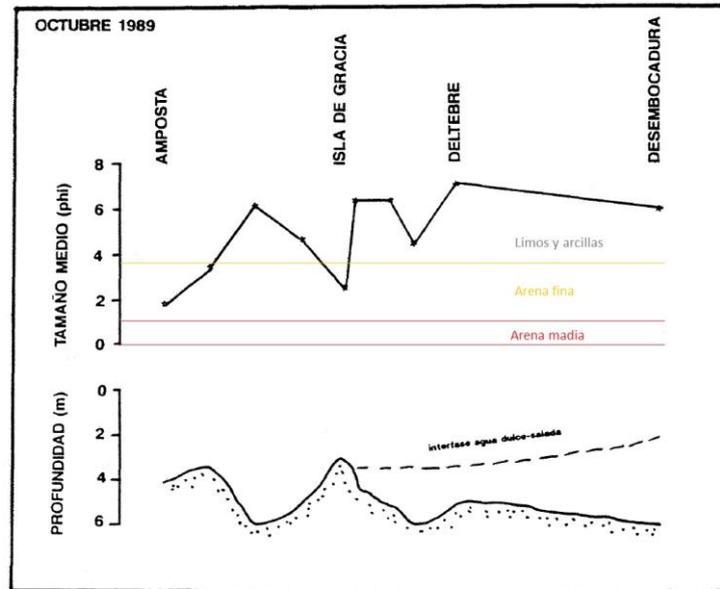


Figura 4,4: Distribución del sedimento del lecho del río en Octubre de 1989 y su relación con la morfología del cauce, donde se ha insertado los límites ASTM de las arenas fina y media(Fuente: Guillén, 1992)

Según se aprecia en la Figura 4.4, la arena se situaba en los puntos más elevados de lo que aparentemente es una onda de sedimento. Los porcentajes de arena en el lecho del río también los evaluó (Figura 4.5). Se recuerda que por encima de 4 en la escala Phi esta la fracción de finos.

	CENTRO	IZQUIERDA	DERECHA
AMPOSTA			
superficie			
media	5,09	5,59	1,80
%arena	46,3	36,81	4,79
fondo			
media	4,25	4,05	-2,20
%arena	59,31	59,31	14,81
DELTEBRE			
superficie			
media	7,17	6,69	6,71
%arena	12,00	19,14	20,17
fondo			
media	3,08	3,29	-
%arena	76,28	75,46	-
DESEMBOCADURA			
superficie			
media	6,14	5,93	5,89
%arena	30,29	34,06	32,56
fondo			
media	2,96	4,08	3,07
%arena	79,33	61,14	80,13

Figura 4.5: Media granulométrica en escala phi y porcentaje de la fracción arena de los sedimentos del lecho del río analizados en la campaña de Octubre de 1989. Comparación entre el sedimento



*superficial y el sub superficial situado entre 2 y 5 cm por debajo de la interfase agua-sedimento
(Fuente: Guillén, 1992)*

Las gravas solamente aparecieron en la margen derecha de Amposta, con tamaños que no superaban 1,5 Phi, que sería en la clasificación ASTM, arena gruesa.

El capítulo 8 se dedica a cuantificar los aportes de sedimento del Río al mar. Finaliza diciendo: “para el período con caudales medios de 700 m³/s (cuatro meses), el transporte como carga de fondo del Río Ebro en su desembocadura durante el período de Mayo de 1988 a Mayo de 1991 es de 145.000 Toneladas, que representan unos aportes de cerca de 50.000 t/año. La misma estimación realizada con los datos de la trampa de sedimentos da unos aportes de 220 t/año, mientras que con el dato de máximo transporte obtenido con la migración de estructuras de fondo sería de 120.000 t/año...”

Por tanto, el transporte de material más grueso, con un porcentaje de arenas importante, sería de:

- Media: 50.000 t/año (20.000 m³/año)
- Máximo: 120.000 t/año (48.000 m³/año)

Como, dato final, indica que: “Los aportes sedimentarios del Río Ebro han sido estimados, durante el período de estudio, en 100.000 t/año en lo que se refiere al transporte en suspensión, y en menos de 50.000 t/año respecto al transporte como carga de fondo. En volumen, el total de los aportes del río al medio marino sería de aproximadamente 100.000 m³/año”.

“ESTUDIO DE LA DINÁMICA LITORAL DEL DELTA DEL EBRO Y PROGNOSIS DE SU EVOLUCIÓN (DINÁMICA LITORAL DEL DELTA DEL EBRO) - INFORME FINAL” CEDEX (PEÑA, 1996)

El informe del CEDEX (1996) para la Dirección General de Costas es un estudio monográfico de la dinámica litoral del sistema litoral que compone el Delta del Ebro. Este trabajo, como el PIDU (1978) es poco conocido y citado. En su apartado 5,2 se ocupa de “las fuentes y naturaleza de los sedimentos” y en él se puede leer:

“La principal fuente sedimentaria del tramo de costa en estudio la compone el propio río Ebro y, ocasionalmente, de forma secundaria la franja litoral aguas arriba [...] se encuentra en la actualidad regulado en el 97% de su cuenca, dejando una superficie de cuenca libre, en las proximidades de su desembocadura, de 2.316 km² [...] Esta situación ha llevado a reducir considerablemente los aportes sólidos del río Ebro que, según diversos autores, ha sido a lo largo del tiempo: [ver tabla 4.3]”

Año	Autor	x 10⁶ (t/año)	x 10⁶ (m³/año)
1880	Gorría	25	10
1936	Carreras i Candi	17	6,8
1976-78	PIDU	2	0,8
1990	Nelson	6,2	2,48
1990	Jiménez et al.	0,107-0,263	0,0428-0,1052



A continuación, utilizando los datos que suministró el Centro de Estudios Hidrográfico de las retenciones de aportes sólidos en los embalses aguas arriba del Ebro, concluye diciendo: “Con estos datos obtenidos por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, se puede deducir que los aportes sólidos, en un año medio, que rebasan la barrera de la presa de Ribarroja es de 333.000 t/año. Por otra parte, el resto de cuenca, hasta Tortosa, que queda sin regular es de 84.230 km² - 81.914 km² = 2.316 km², con un aporte medio anual de 111,5 t/km² año, lo que da un aporte total de la cuenca libre de 258.234 t/año que unidas al aporte de sólidos que atraviesan la presa de Ribarroja hace un total de 591.234 t/año, que es el aporte esperado en un año medio. Si se siguen las proporciones de aportaciones punta y mínima del río Ebro dada por el P.I.D. U. que les asigna coeficientes de 1,7 y 0,5 respectivamente, se tendría que el aporte sólido esperado del río Ebro al mar estaría comprendido entre:

590.000 t/año (año medio)
 1.000.000 t/año (1,7 año medio)
 295.000 t/año (0,5 año medio)

Si se considera que las grandes presas de la cuenca del río Ebro son las que detienen la gran mayoría del caudal sólido del río, sumando los caudales sólidos retenidos por éstas en un año medio, dado por los estudios realizados en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX entre 1979 y 1988 [...], da un valor de 10.954.102 t/año, teniendo todas las presas consideradas un volumen embalsado de 2.732,05 Hm³ frente a un total de cuenca de 5.627,5 Hm³.

Si se supone las cifras anteriores como el total retenido de posibles aportes sólidos del río Ebro, la cantidad considerada como aporte actual del Río al mar supone tan solo el 5,12%. Pudiéndose considerar como aporte medio anual en torno a 12.000.000 t/año, que supondría una punta de 20.000.000 T/año y un mínimo de 6.000.000 T/año, cifras que estarían en torno a las dadas por los primeros autores, teniendo en cuenta que en este sencillo cálculo únicamente se han considerado las grandes presas y por tanto las cifras aportadas serían algo menores de las que saldrían al considerar todas las presas de la cuenca del río Ebro.

Finalmente debe considerarse que gran cantidad del material aportado por el río Ebro en un año medio será en suspensión, si bien el comportamiento en ambos fluidos, río y mar, no tiene por qué ser el mismo. Así mismo, es difícilmente evaluable la cantidad de los diversos materiales que componen el material de aporte del río al mar, pudiéndose suponer que no más de un porcentaje entre el 5 y 20% será de arena, y el resto podría considerárseles como fangos. Si estas suposiciones son ciertas la cantidad de material anteriormente apuntada podría desglosarse según el tipo granulométrico de material en (Figura 4.6):”

	ARENA Tm/año (5% - 20%)	FANGO Tm/año (95% - 80%)
Año medio	29.500-118.000	560.500-472.000
Máximo	50.150-200.600	952.850-802.400
Mínimo	14.750-59.000	280.250-236.000

Figura 4.6: Aportes sólidos del río Ebro al mar estimados por Peña (1996) [CEDEX, 1996]



Que pasado a unidades de $m^3/año$, con el mismo criterio que los anteriores daría un aporte medio de arena de: 11.800 a 47.200 $m^3/año$.

“EL SISTEMA SEDIMENTARIO DEL DELTA DEL EBRO” (SERRA, 1997)

En su artículo, contribución al monográfico sobre el Delta del Ebro de la Revista de Obras Públicas de 1997, da un repaso general de algunos de los datos existentes de los aportes de sedimentos en suspensión entre los que se encuentran los que se presentan a continuación en forma de tabla 4.4:

Año	Autor	$\times 10^6$ (t/año)	$\times 10^6$ ($m^3/año$)
1935	Bayerri (en Tortosa)	15-20	6-8
1969	Catalán (en Flix)	2,2	0,88
1987	Palanques	0,15	0,06

“INFORME SÍNTESIS SOBRE LA VULNERABILIDAD DEL DELTA DEL EBRO. PROPUESTA DE MEDIDAS GENERALES EN EL ÁMBITO DEL DELTA” (BERGA Y BERGA, 2017).

Este trabajo aborda los aportes de sedimentos en el capítulo 9, con un apartado “Evolución del aporte de sedimentos al delta del Ebro”. En él indican que “La cuenca del Ebro está regulada mediante unas 153 grandes presas que suponen una capacidad de embalse total de unos 7.580 hm^3 ”.

Y siguen diciendo: “En el tramo inferior del río Ebro hay tres presas significativas: Mequinenza (1966) con una capacidad de 1.530 Hm^3 , Ribarroja (1969) con una capacidad de 219 Hm^3 , y Flix (1948) con una capacidad de 11 Hm^3 . Estas presas suponen una barrera para los sedimentos que transporta el río, reteniendo la totalidad de los áridos gruesos, y alrededor del 96% de los sólidos en suspensión”; acorde con lo expuesto en PIDU (1978) y Peña-CEDEX (1996). Y comentan, al igual que los trabajos anteriormente expuestos que, a efectos costeros “el sedimento más importante para contribuir a la estabilidad de la costa es el sedimento grueso (tamaño arena > 150 μm)”.

A continuación presentan un gráfico (Figura 2.100). Y finalmente comentan:

“En síntesis, el orden de magnitud de los valores de la carga a principios del Siglo XX puede evaluarse entre 20 $Mt/año$ y 25 $Mt/año$. Este valor se reduce sensiblemente en los años 60, antes de poner en explotación las presas, hasta unas 12 $Mt/año$. La reducción es mucho mayor por el efecto barrera de las presas, reducción del orden del 96%, y en la actualidad la carga sólida es de unas 0.5 $Mt/año$ ”

El problema final es que han calculado toda la carga sólida (500.000 $t/año$) que teóricamente llega al río y no la fracción de arena, que es la importante desde el punto de vista costero. Si se aplicase el porcentaje de Peña (CEDEX, 1996) de la horquilla del 5%-20% daría una carga sólida de arena situada entre 25.000-100.000 $t/año$ que pasado a metros cúbicos (densidad 2,5 t/m^3) sería: 10.000-40.000 $m^3/año$; que se encuentra acorde con el resto de los cálculos de otros trabajos.



OTROS ESTUDIOS

Aparte de estos estudios, existen otros dispersos a los que no han hecho referencia los trabajos anteriores, entre los que destacan:

1) “Long to short term coastal changes and sediment transport in the Ebro delta; a multi-scale approach” (Jiménez, Sánchez-Arcilla y Maldonado, 1997). En él dicen respecto al aporte de sedimentos del río Ebro al mar: “El umbral de descarga de agua del río para sedimentos de arena, con un tamaño de grano de sedimento similar al presente en la costa zona, se ha estimado en unos 400 m³/s (Jiménez et al., 1990). Estos autores han hecho una estimación de la "capacidad de transporte potencial" del río, obteniendo una tasa de transporte de aproximadamente 30,000 m³/año, que es similar a lo estimado por otros autores (e.g. Guillen, 1992)”.

2) “Plan de actuación para la mejora del régimen sedimentario en el ámbito del delta del Ebro. Nota Técnica Caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Mequinenza y Ribarroja y en el curso bajo del río Ebro (Tarea 2.1)” (CEH-CEDEX, 2020). Esta nota técnica ha sido resumida en el capítulo 3; estudia el efecto que han tenido los dos grandes embalses de la cuenca del río Ebro: Mequinenza y Ribarroja, en la retención de sedimentos, y por tanto en la detracción de ellos al mar. En él se indica, entre una de las conclusiones que la tasa de transporte de sedimentos en suspensión aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Ribarroja y Flix es de 0,37. 106 t/año (durante los primeros años de tras la puesta en explotación de las presas era de 0,83. 106 t/año). Al igual que en el caso anterior, a estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.

También, es muy interesante la caracterización que se hace de los sedimentos del embalse de Mequinenza, en base a una serie de sondeos realizados en él en el año 2012 que indica que de los 40,2 hm³ de sedimento que existen en este tramo, 10,67 hm³ son de arena y 3,73 hm³ son de grava. Estos valores son muy interesantes a la hora de evaluar la capacidad como fuente de arena para las playas del Delta del Ebro.

4.1.1.2 Evolución en el tiempo de los aportes del Río Ebro al mar

El estudio de la evolución de los aportes que el río Ebro ha ido efectuando al mar a lo largo del tiempo hasta la actualidad solamente se puede realizar de manera indirecta y asumiendo una serie de hipótesis sobre su evolución histórica y utilizando herramientas propias de estudios geológicos. Pocos trabajos se han ocupado de ello, aunque en algunos casos son poco fiables, dado que se contradicen con la cartografía antigua.

Si se hace caso de las crónicas más antiguas (Plinio) en el siglo I dC no existía delta emergido (Peña, 2011-16), aunque es posible, como indica el PIDU (1978) que sí hubiese un delta sumergido (El PIDU tiene un error: ya que en “Ora Marítima” de Avieno no habla del Delta del Ebro, solamente dice que era un río navegable). El avance efectuado hasta la fecha sería de 24.800 m aproximadamente. Y si se toma un valor, también aproximado, de 1900 años como periodo de avance, se tendría que el Delta del Ebro ha experimentado un avance medio de 13 m/año. Si el volumen aproximado (PIDU, 1978) del Delta se hallase en torno a 28.000 Hm³ y se supone que el 35% de esta cantidad había formado ya el delta sumergido, entonces indicaría que los aportes medios se encontrarían en torno a:



$$\frac{0,65.28000.10^6}{1900} = 9,6.10^6 \text{ m}^3/\text{año} (\approx 24.10^6 \text{ t/año})$$

Ello indicaría que en algún periodo de tiempo de la historia del Delta se produjeron unos aportes mucho mayores que los calculados hasta ahora.

Los cálculos que realiza el PIDU (1978), son diferentes, pues parten para su cálculo al revés: Supone unas tasas iniciales de aporte del río de:

Tabla 4.5: Aportes medios del río Ebro a lo largo de la historia (PIDU, 1978)		
Periodo	Aporte x 10⁶ (t/año)	Aporte x 10⁶ (m³/año)
a.C.	3	1,2
1-1200	3	1,2
1200-1600	16	6,4
1600-1800	22	8,8
1800-1960	20	8
1960-1977	3	1,2

Con estos valores, determina la edad del Delta que evalúa en 12.000 años. Aunque parecen poco realistas los datos dados para las épocas anteriores a 1800 si se hace caso a otras formaciones de depósito de la península Ibérica.

4.1.1.3 Aportes actuales del río Ebro al mar

Los aportes actuales que el río proporciona al mar y plataforma del Delta son muy discontinuos y, con toda probabilidad han ido disminuyendo a medida que la parte baja del río, cuenca no regulada, se ha ido tupiendo de vegetación, agricultura y urbanismo. Si se hace un recuento de los datos que proporcionan los diferentes autores; separándolos estos en arrastre (arena en su mayoría) y suspensión (fango en su mayoría) y se toma la horquilla de éstos, podría asimilarse ésta a un máximo y un mínimo de aportes.

Tabla 4.6: Aportes actuales de arena del río Ebro según autores		
Año	Autor	Aporte x 10³ (m³/año)
1978	PIDU	200
1987	Palanques	60
1992	Guillén	20-48
1996	Peña	11,8-47,2
1997	Jiménez et al.	30

Por tanto, puede considerarse que el aporte medio de arena del río Ebro se encontraría entre 12.000 y 48.000 m³/año, y por tanto puede darse como representativo un valor medio de 30.000 m³/año; con unas puntas que pueden alcanzar, usando un coeficiente de 1,7, los 82.000 m³/año, con un valor medio de 51.000 m³/año.

4.1.1.4 Dirección de los aportes

El problema de la fuente de arena o sedimento, no solamente radica en la cantidad que aporta al mar y las playas del Delta, también lo es el sentido de la distribución de este aporte (Peña-CEDEX, 1996). Las últimas fotografías verticales que muestran cómo estaba saliendo el sedimento en el temporal Gloria de enero de 2020 son bastante elocuentes de esa distribución (Figura 4.7).



Figura 4.7: Tres momentos de descarga del sedimento del río Ebro al mar en el temporal Gloria de febrero de 2020 (Fuente: Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya-ICGC)

La primera instantánea de la Figura 4.7, muestra cómo se distribuye el sedimento a lo largo del hemidelta norte y una pequeñísima fracción se dirige a la punta del Delta (Figura 4.8). Se produce así una distribución asimétrica de sedimentos en el exterior del Delta que provoca una descompensación de aportes al norte y sur de la desembocadura.



Figura 4.8: Movimientos de sedimento observados en la imagen de satélite del 23 de febrero de 2020, una vez que los expulsa el río Ebro, y su distribución asimétrica espacial (Fuente: ICGC)

Cuando el sedimento más fino es expulsado por el Río, y el oleaje no es tan intenso y/ lleva otra dirección, p.ej. NW-SE, entonces se produce una nube en forma de vórtice que aleja el sedimento de la costa como se observa en la foto del 26 de febrero (Figuras 4.7 y 4.9).



Figura 4.9: Movimientos de sedimento observados en la imagen de satélite del 26 de febrero de 2020, una vez que los expulsa el río Ebro, y su distribución asimétrica espacial (Fuente: ICGC)

Por tanto, el aporte de sedimentos, especialmente de arena, es totalmente asimétrico; pudiéndose suponer que de las cantidades que aporta el río Ebro, evaluadas en el apartado anterior, prácticamente la totalidad, al menos más del 95%, se distribuyen en el hemidelta norte, especialmente en la isla de San Antonio y proximidades y la punta del Fangar. Y se puede considerar nulo, o próximo a él, el aporte del Río al hemidelta sur.

Si se consideran las proporciones de distribución indicadas (95%-5%) entonces los aportes medios recibidos por el hemidelta norte serían del orden de 28.500 m³/año y al hemidelta sur de 1.500 m³/año.

4.1.2 Distribución de la arena en la plataforma deltaica

Pocos trabajos se ocupan de cómo se distribuye la arena en la plataforma interna del Delta, superficie deltaica. De todos ellos los más interesantes y que dan más información son:

1. Guillén (1992)
2. Peña-CEDEX (1996)
3. Cartas Náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina

4.1.2.1 Guillén (1992)

En su tesis doctoral presenta los límites de los fangos en la plataforma costera (Figura 4.10). En ella se aprecia que los fangos aparecen en la superficie de la plataforma interna del Delta, de manera generalizada, a partir de los 4 m de profundidad.

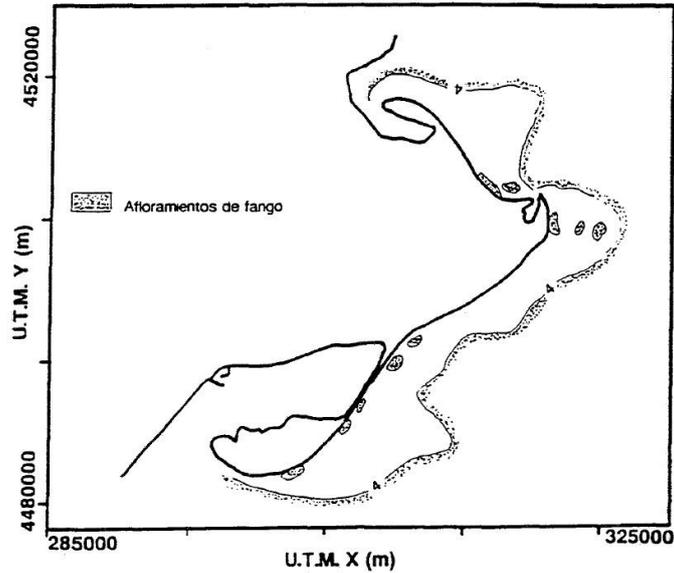


Figura 4.10: Límite de los afloramientos de fangos en la plataforma interna del Delta del Ebro
(Fuente: Guillén, 1992)

En el trabajo que realiza Guillén con Maldonado (1992) para GENCAT presenta una distribución superficial de sedimentos de la plataforma costera, distinguiendo tres grupos: arena media y fina, arena muy fina, y fangos (Figura 4.11).

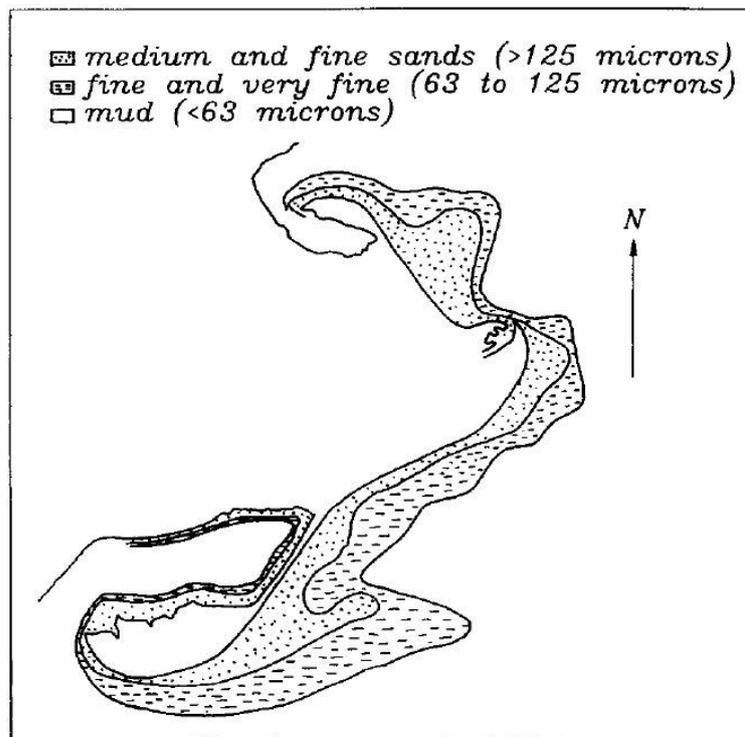


Figura 4.11: Distribución de sedimentos en la plataforma interna del Delta (>125 μm , arena fina en ASTM; entre 63 y 125 μm , límite arena fina en ASTM; <63 μm , limos y arcillas en ASTM).
(Fuente: Maldonado, 1992)

4.1.2.2 Peña-CEDEX (1996)

El estudio del CEDEX de dinámica litoral (Peña, 1996) analiza las características de los fondos utilizando dos fuentes: El estudio del Instituto Español de Oceanografía (Rey y Medialdea, 1989), y los datos que presentan las Cartas Náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina.

De la primera de ellas recoge un párrafo completo de la publicación que describe los fondos de la plataforma interna del Delta del Ebro (Figura 4.12):

"...La plataforma continental del delta del Ebro constituye un buen ejemplo de sedimentación silicoclástica. La distribución de facies sobre su superficie está controlada por el aporte de terrígenos del río en función de las condiciones hidrodinámicas y el régimen general de circulación. En la parte externa de la plataforma se observa un equilibrio dinámico entre los procesos y las facies, mientras que en su parte interna hay depósitos relictos o palimpsest (según Verdaguer, 1983; Maldonado y Zamarreño, 1983). Desde la zona litoral, se produce aguas afuera una disminución progresiva del tamaño del grano. El prodelta del río Ebro ocupa una notable extensión de la plataforma y texturalmente se caracteriza por sedimentos finos (limos en el prodelta proximal y arcillas limosas en el prodelta distal) con un alto contenido en materia orgánica, que en su mayoría son de origen fluvial (IGME, 1986). La parte más externa de la plataforma está recubierta por depósitos de arena correspondientes a antiguos ambientes litorales, relacionados con el último ascenso austático del nivel del mar (Maldonado y Zamarreño, 1983). La contribución biógena de los depósitos de esta plataforma es generalmente baja, excepto en áreas de poco aporte terrígeno..." (Rey y Medialdea, 1989)

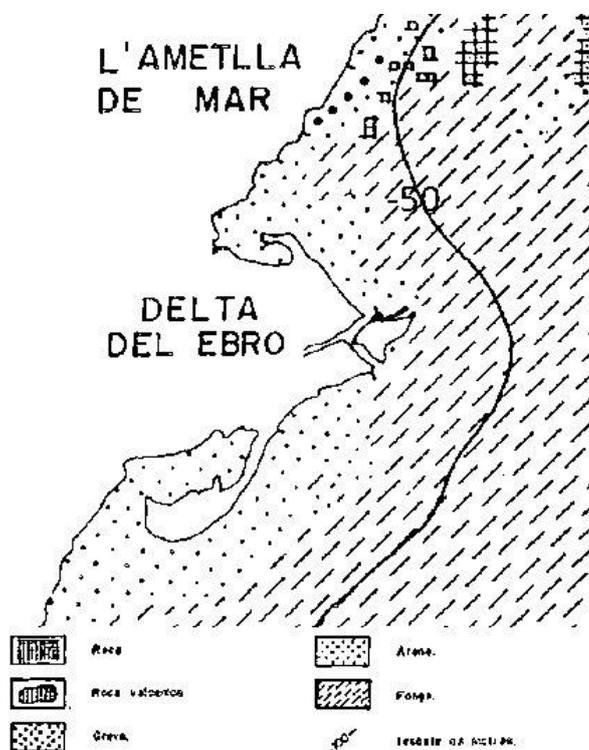


Figura 4.12: Sedimentos superficiales en la plataforma interna del Delta del Ebro (Fuente: Rey y Medialdea, 1989)

La segunda de las fuentes que utiliza este informe son los datos que suministran los sondeos y toma de muestras que aparecen en los parcelarios y cartas náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina Española. Basándose en ellos, presenta un plano de los sedimentos superficiales de la plataforma interna del Delta del Ebro (Figura 4.13) y un plano de secciones de diversos puntos del delta con la naturaleza superficial de ellos (Figura 4.14). Tras el estudio y análisis de las fuentes, llega a las siguientes conclusiones:

1. El movimiento de arenas a lo largo de la costa del delta del Ebro es cerrado, no habiendo transmisión ni continuidad de este tipo de sedimento aguas arriba ni aguas abajo del Delta.
2. Existen dos pronunciados prodeltas sumergidos arenosos coincidiendo con la gola Norte y la actual desembocadura; siendo mucho más pronunciado y principal el prodelta arenoso de la gola Norte, estando su eje escorado al este-sur.
3. La plataforma costera tipo arenosa es de bastante mayor anchura en la zona sur del delta del Ebro que en la zona norte, siguiendo una curva bajo fondo en torno a los 17 metros, excepto en el prodelta de la gola Norte.
4. La plataforma costera tipo fangosa se extiende desde los límites del sedimento arenoso hacia mayores profundidades. El fango en su mayoría es transportado por suspensión lo que hace que se encuentre, tanto mezclado con las arenas, como sólo en lugares más alejados.
5. No existe, superficialmente, ningún otro tipo de material en el entorno de la plataforma interna del delta del Ebro salvo una pequeña área de algas en el interior del Puerto de los Alfaques.

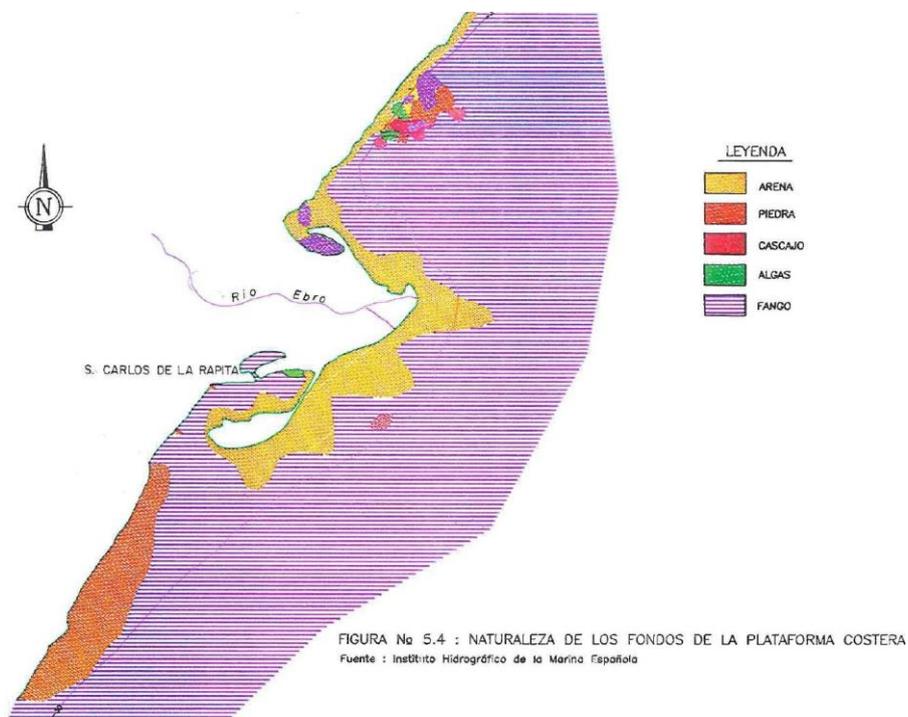


Figura 4.13: Naturaleza de los fondos superficiales de la plataforma interna del Delta del Ebro según las cartas náuticas y parcelarios del Instituto Hidrográfico de la Marina (Fuente: Peña-CEDEX, 1996)

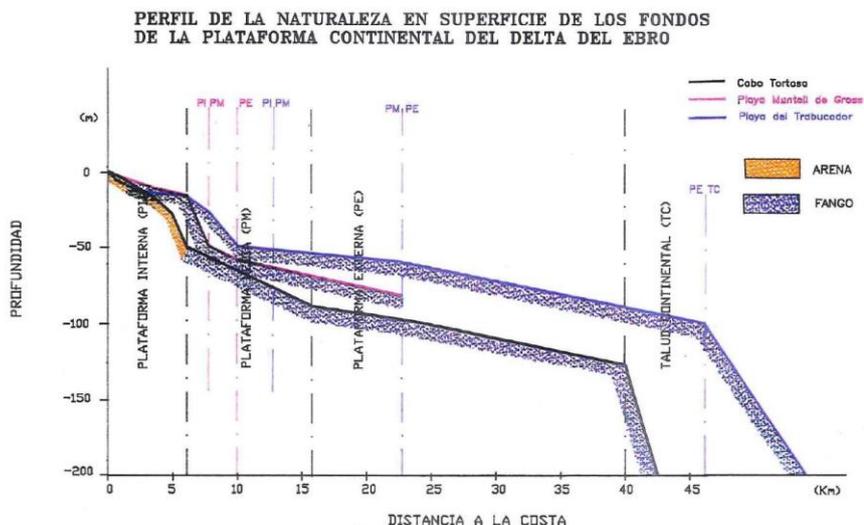


Figura 4.14: Naturaleza de los fondos superficiales de tres secciones del Delta del Ebro según las cartas náuticas y parcelarios del Instituto Hidrográfico de la Marina. (Fuente: Peña-CEDEX, 1996)

4.1.2.3 Cartas Náuticas del Instituto Hidrográfico de la Marina-IHM (1974 y 2019)

Para completar la información suministrada por anteriores trabajos, se ha analizado los datos que suministra las cartas náuticas, más centrado en la plataforma interna del Delta, o prodelta, siguiendo así la metodología de Peña (1996). Para ello se han elegido dos cartas náuticas: Las correspondientes a 1973-74 y 2019. Pero, antes, para darse una idea del estado anterior a ellas, en la Figura 4.15 se presentan los datos correspondientes a las sondas de la carta náutica de 1945.

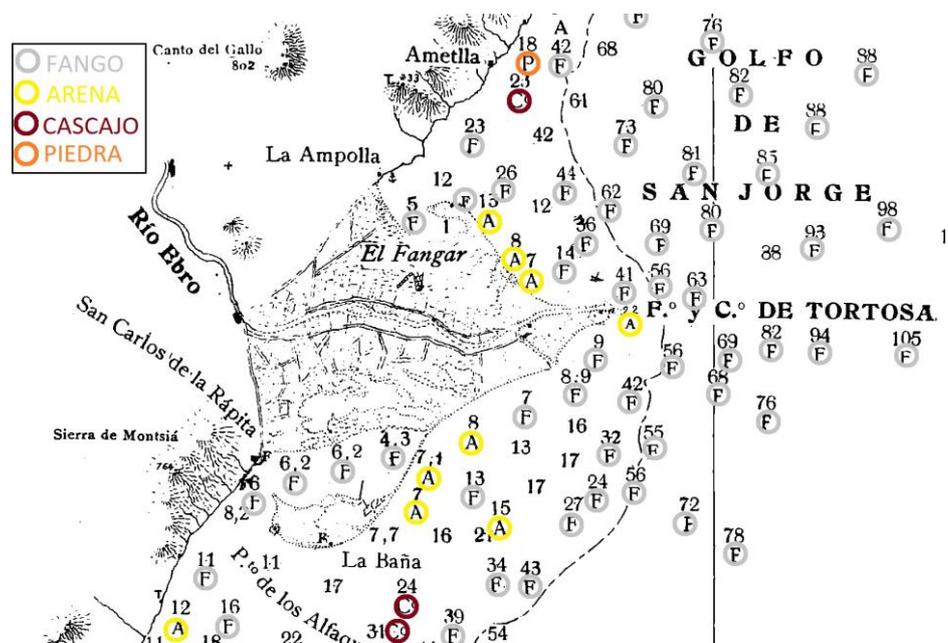


Figura 4.15: Naturaleza de los fondos superficiales en las sondas de la carta náutica de 1945 en torno al Delta del Ebro (Fuente: IHM)

Para completar estos datos, se ha tomado la carta náutica nº 485 editada en 1976, con sondajes de 1973 y 1974; y sobre ella se ha dibujado la superficie de la plataforma interna del Delta cuyas sondas dan arena que se muestra en la Figura 4.16.

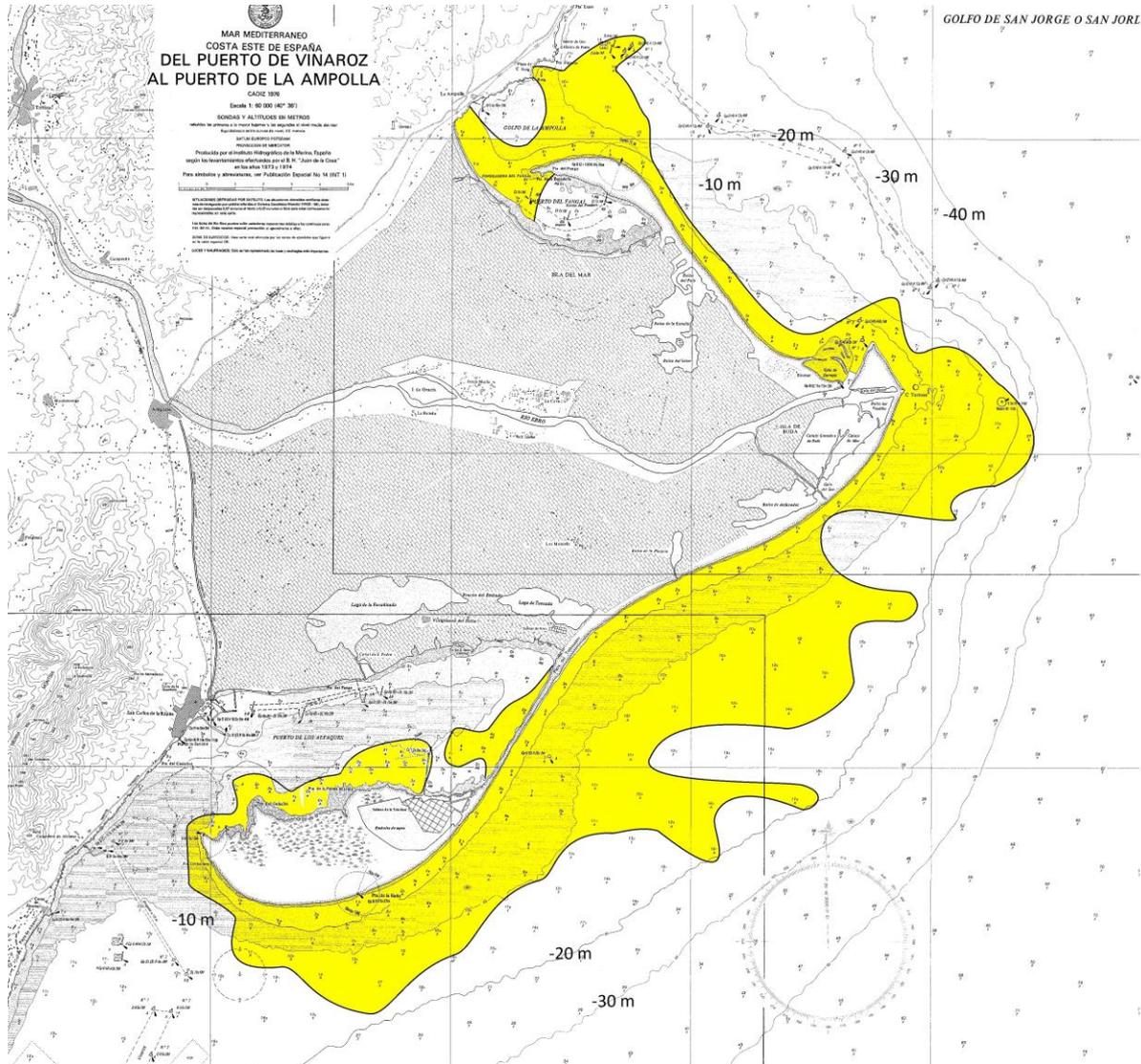


Figura 4.16: Área de arena (en amarillo) de la plataforma interna del Delta del Ebro según los datos que posee la carta náutica nº 485 de 1976, tomados entre 1973 y 1974 (Fuente: IHM)

Como puede observarse; no existe continuidad de arena entre la plataforma interna deltaica y el resto de la costa, norte y sur, lo que corroboraría la afirmación del informe del CEDEX (Peña, 1996) de que el sistema litoral del delta es cerrado e independiente del resto de la costa norte y sur en lo referente al movimiento de arenas. Ello indicaría que las arenas, que aporta el río se quedan en esa unidad fisiográfica que forma el Delta del Ebro; no teniendo una pérdida significativa de este tipo de sedimento ni hacia el norte ni hacia el sur del Delta.

La segunda carta náutica utilizada es la correspondiente a 2019 (Figura 4.17), suministrada por el Instituto Hidrográfico de la Marina; en ella se han dibujado de la plataforma interna,

además de la superficie de arena (amarillo), las áreas correspondientes a fango, cascajo y piedra.

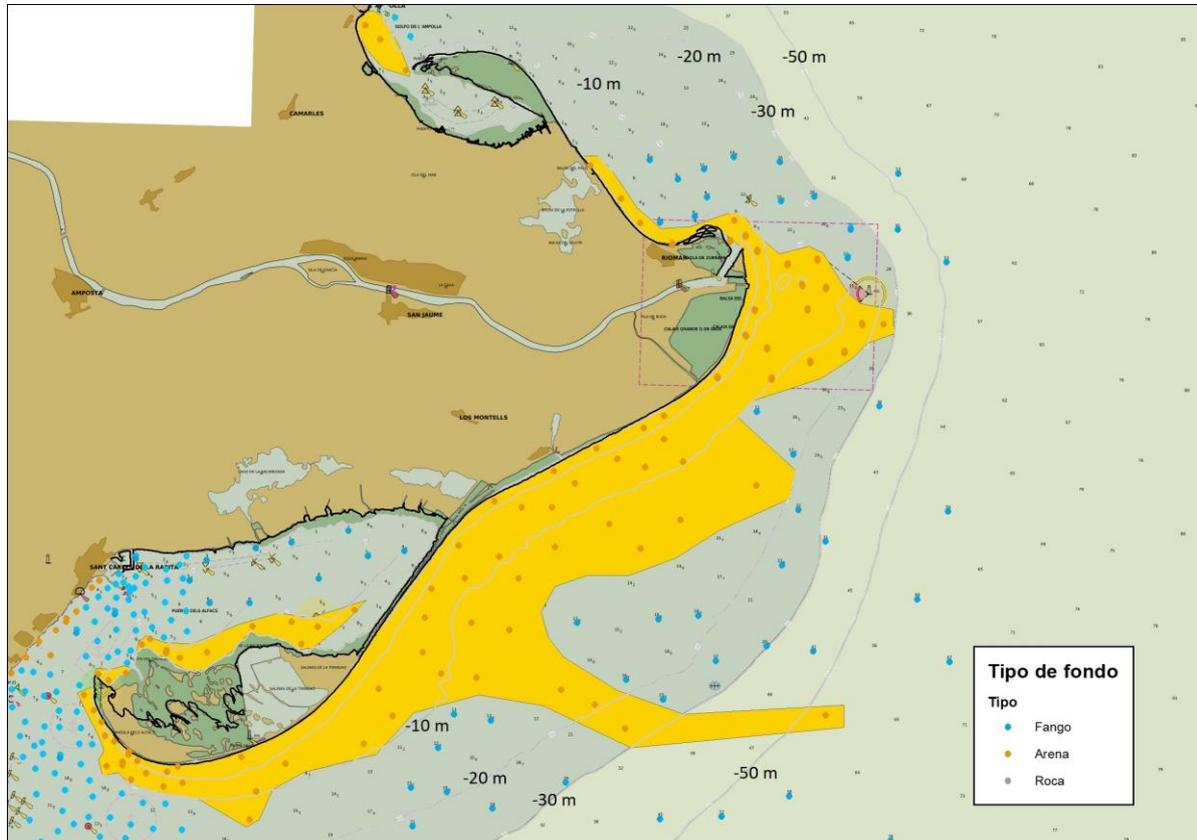


Figura 4.17: Área de arena (en amarillo) de la plataforma interna del Delta del Ebro según los datos que posee la carta náutica de 2019 (Fuente: IHM)

Existen pocas variaciones entre 1974 y 2019 de la superficie sumergida que ocupa la arena en la plataforma interna. Quizás lo más llamativo sea la lengua transversal que se ha expandido hacia el fondo frente a la Barra del Trabucador. En algunas zonas de la plataforma del hemidelta norte donde en 2019 no aparece arena, no quiere decir que no la haya, sino que las sondas no han tomado el dato. La superficie de arena de la plataforma del hemidelta sur ha aumentado al sur de la Illa de Buda.

De cualquiera de las maneras, los datos que se poseen de las características de los sedimentos superficiales de la plataforma del Delta son, en general bastante pobres, y prácticamente inexistentes en cuanto a la potencia de las capas de arena. Es muy significativo la falta de datos de las zonas que se supone de sumideros como son las dos bahías, del Fangar y los Alfaques.

4.1.3 Sumideros de sedimento

Se entiende por sumidero de un sistema litoral aquella zona donde se deposita el sedimento, movido por el transporte sólido litoral, sin posibilidad de que el transporte de sedimentos de nuevo lo pueda mover, es decir, una zona de depósitos fuera de la dinámica litoral. En el

sistema litoral que forma el Delta del Ebro existen dos sumideros, al norte y sur, formados por las bahías del Fangar al norte y los Alfaques al sur (Figura 4.18).

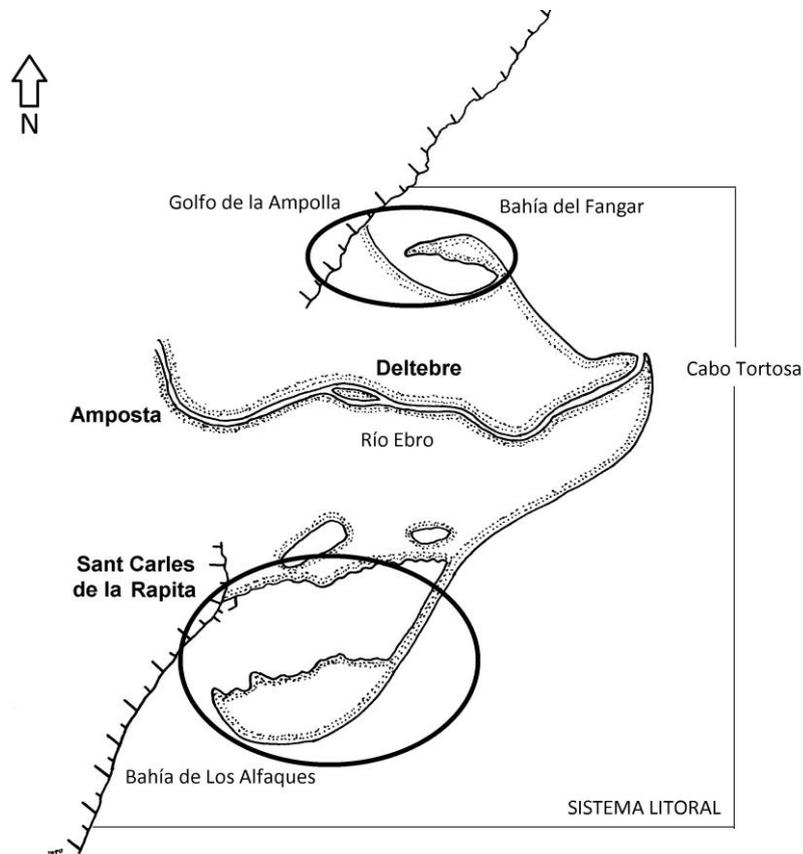


Figura 4.18: Sumideros de sedimento en el sistema litoral del Delta del Ebro

La cuantificación de ese sedimento acumulado en ambos sumideros es imprescindible para conocer y cerrar el balance de sedimentos que discurren anualmente a lo largo de las costas de Delta del Ebro. Para ello, se tiene que realizar batimetrías y comparar sus estados a lo largo del tiempo, obteniendo así el volumen de sedimento (fango y arena) que se deposita en ellos.

En ninguno de los trabajos que se han analizado cuantifican este volumen de depósito anual; lo más próximo a ello es el dato final que suministran los diferentes balances sedimentarios efectuados (Figuras 2.2, 2.12, 2.57 a 2.61, y 2.92) y en todos esos suponen entrada de sedimento cero en la bahía de los Alfaques, para cuadrar el balance.

Las batimetrías que se han utilizado para caracterizar ambos depósitos son las que realiza el IHM. En un primer escalón se han comparado las batimetrías de ambas bahías en las cartas náuticas de 1878-80 y de 1973-74. Para dar una mejor visión de conjunto y sus transformaciones en el tiempo se han retocado, gradando con colores las profundidades, y se muestran las correspondientes a la bahía del Fangar en la Figura 4.19, y las de la bahía de Los Alfaques en la Figura 4.20.



CEDEX

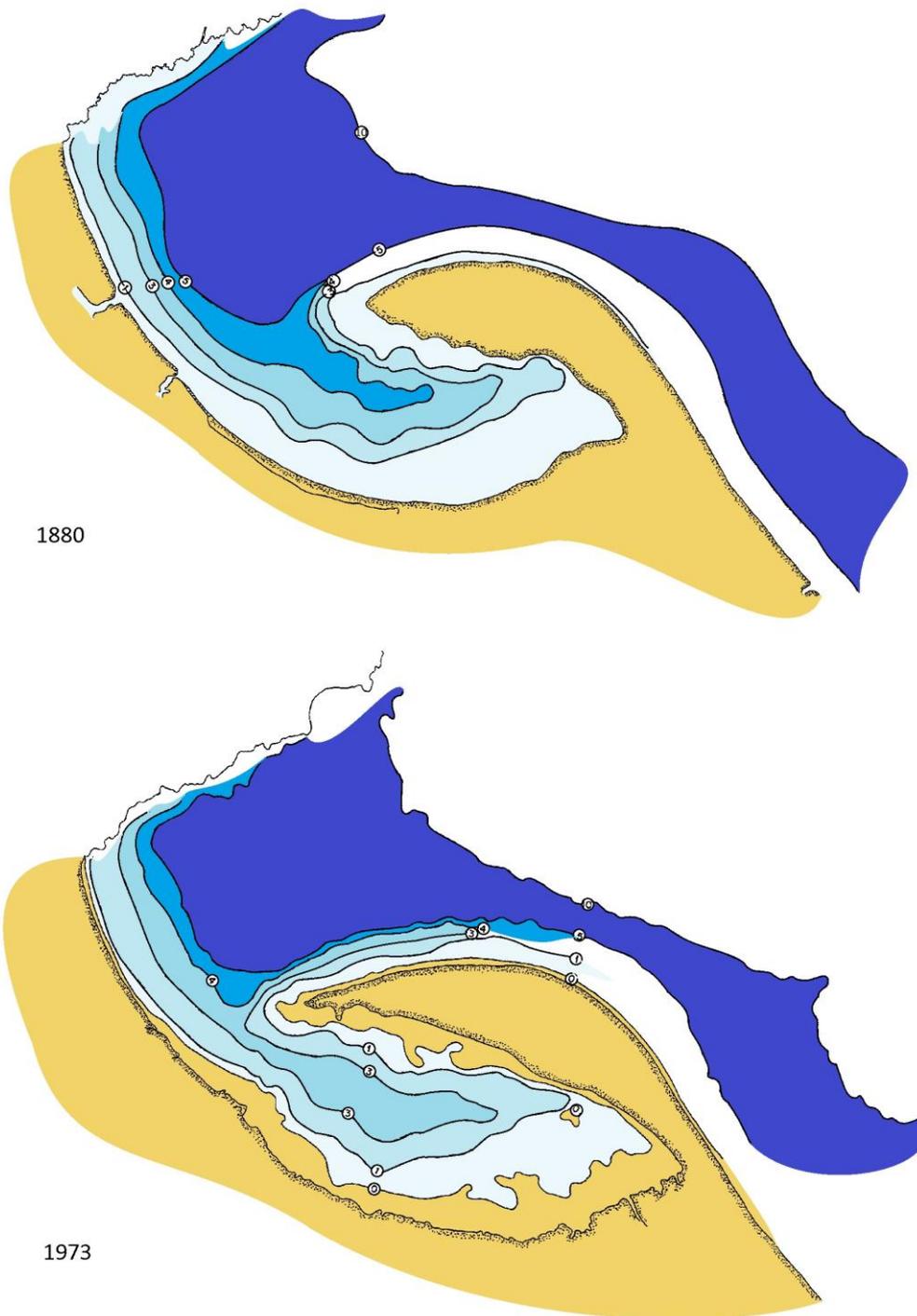


Figura 4.19: Batimetría de la bahía del Fangar y golfo de la Ampolla en 1880 y 1973 (Fuente: IHM)

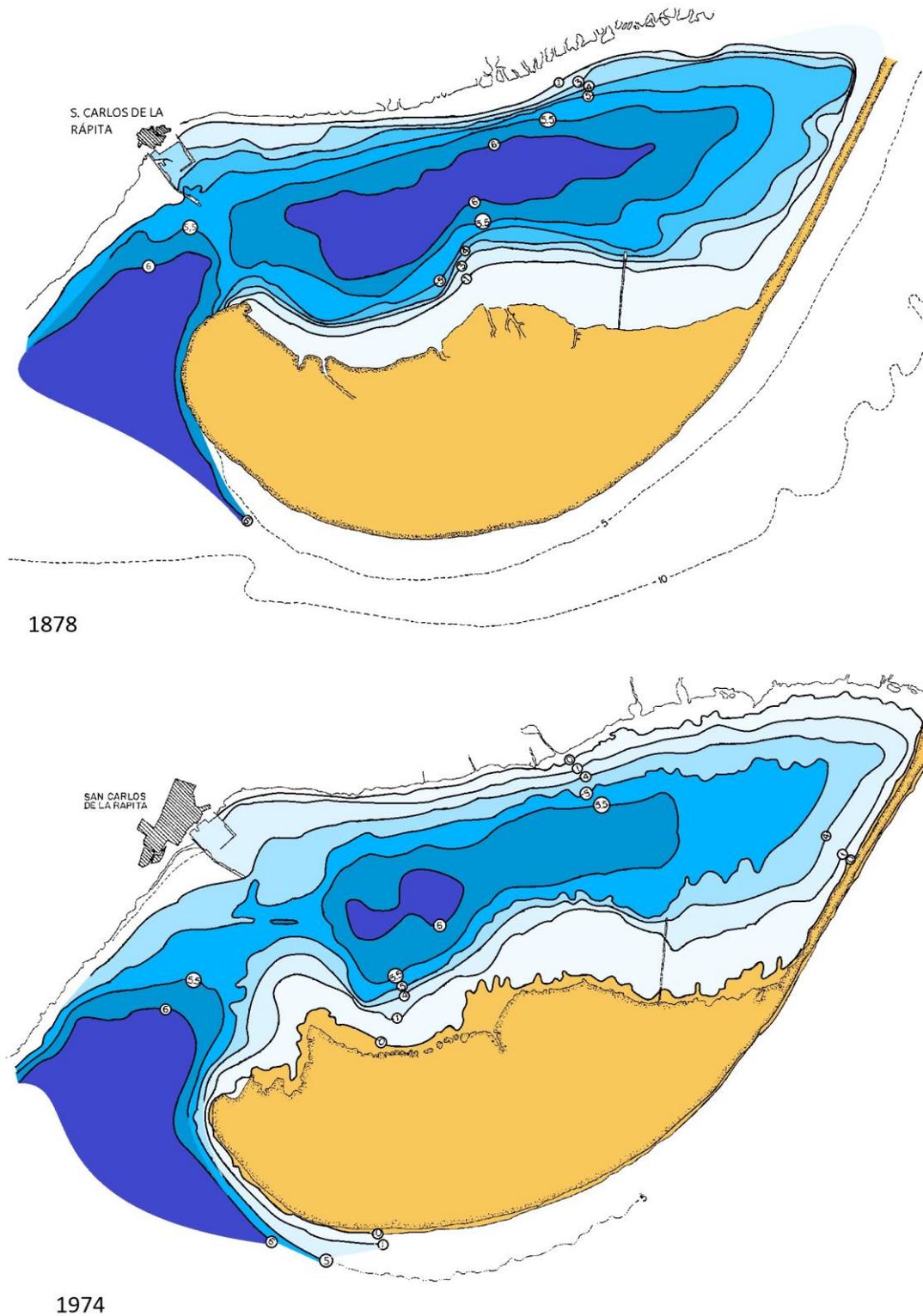


Figura 4.20: Batimetría de la bahía de los Alfaques en 1878 y 1974 (Fuente: IHM)



De la bahía de los Alfaques se ha podido encontrar un referente común de las cartas usadas; que era el morro del dique del puerto de Sant Carles de la Rápita y con él se ha tomado un perfil que parte de éste y va horizontal para observar al grado de llenado de la Bahía (Figura 4.21).

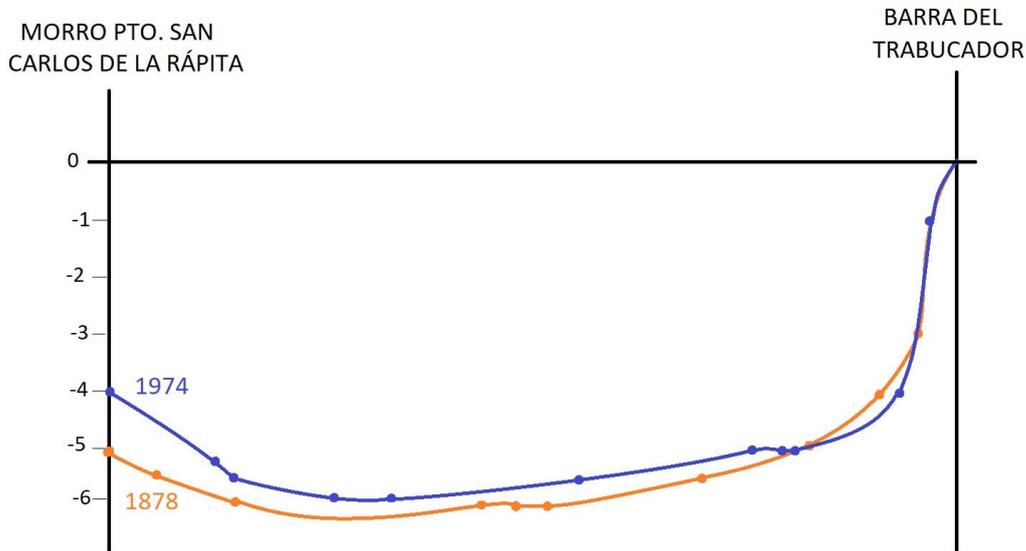


Figura 4.21: Perfil horizontal (Oeste-Este) de la bahía de los Alfaques de 1878 y 1974

De la bahía del Fangar no ha parecido conveniente realizarlo ya que desgraciadamente no se ha encontrado un punto fijo de referencia en ambas cartas; y ya es suficientemente aproximado el cálculo del volumen como para distorsionar aún más esa aproximación. Con ello se ha supuesto que en la bahía del Fangar la pérdida de calados es de 1 m aproximadamente (no se ha contado los depósitos del golfo de L'Ampolla), mientras que en los Alfaques se situaría en torno a 0,5 m. Aproximado también la superficie de ambas bahías, el volumen aproximado que da es:

- Fangar (1880-1973, 93 años): $8,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, o $90.300 \text{ m}^3/\text{año}$
- Los Alfaques (1878-1974, 96 años): $26,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, o $276.000 \text{ m}^3/\text{año}$

Estas cantidades son muy aproximadas y tendrían que corroborarse con datos más precisos; además habría que complementarlo con los datos que suministraría la comparación de la batimetría de 1973-74 con la actual de 2019.

Desgraciadamente, la carta náutica de 2019, actual, la batimetría interior del Fangar y los Alfaques está muy poco definida por lo que no se ha podido hacer una comparación con la misma precisión que en las ediciones anteriores. No obstante, a modo de explicación, en la Figura 4.22 se muestran las batimetrías de 1973 y 2019, cuyos pocos datos de sonda dentro de la bahía hace que su encurvado sea solamente a modo orientativo, por lo que solamente se ha usado la bahía exterior de L'Ampolla. De ella se ha realizado un perfil, P2, para comparar ambos estados (Figura 4.22 B). En él se observa que toda la bahía, al menos hasta la profundidad -5 m ha reducido su calado en torno a 0,5 m de media, lo que daría una acumulación aproximada de sedimento de 980.000 m^3 en 46 años; o lo que es lo mismo

unos 21.000 m³/año. A ello habría que añadirle los sedimentos acumulados en el Fangar que, al tener tan pocos datos de sonda, no son suficientes para una evaluación aproximada. Por ello, a grosso modo podría evaluarse entre 90.000 y 30.000 m³/año la acumulación en todo el conjunto en la actualidad.

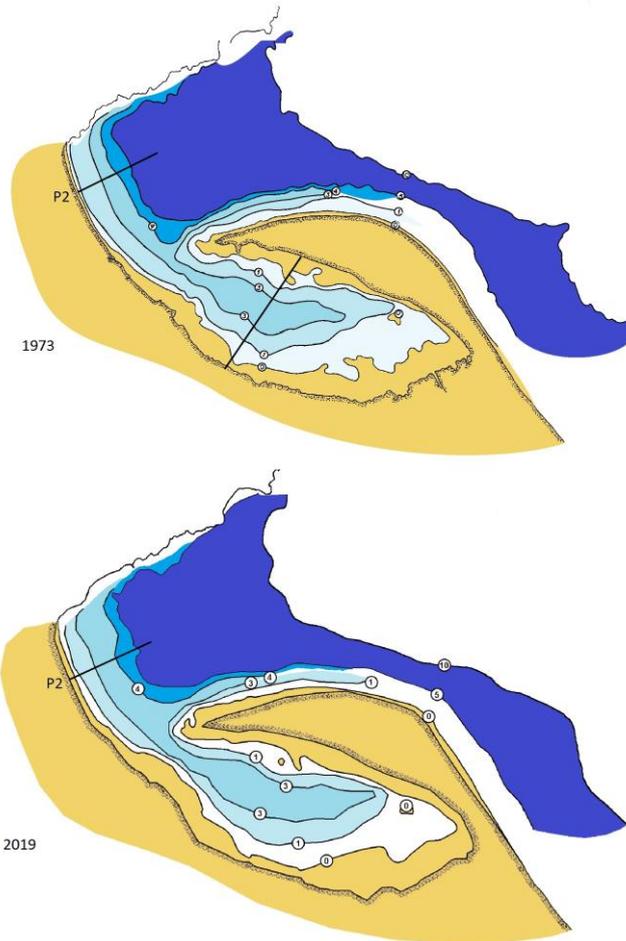


Figura 4.22 A: Batimetría de las bahías del Fangar en la carta náutica de 1973 y 2019

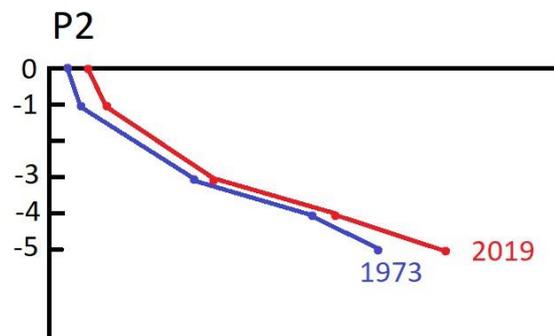


Figura 4.22 B: Perfil P2, del a Figura 4.22, en las carta náutica de 1973 y 2019

4.1.4 Característica de los sedimentos a lo largo de la costa del Delta

Tras analizar las fuentes y sumideros de sedimento, cómo el río los aporta en el mar y la distribución superficial de estos, a continuación se estudia las características físicas más generales de estos sedimentos. Para ello, la fuente fundamental son los diversos trabajos y estudios que se han ido realizando hasta la fecha que contemplan este punto. Algunos trabajos como el PIDU (1978) solamente contemplan características como color y tipo de arena; si fina, media o gruesa, e indica que los materiales están constituidos por una alternancia de arenas y limos arcillosos con una base de gravas.

Aquellos trabajos que presentan datos de las características granulométricas de los sedimentos, arenas especialmente, son los siguientes:

4.1.4.1 “Estudio sobre la regeneración de la playa del Trabucador” (Grassa-CEDEX, 1988)

Para este estudio se tomaron muestras en el estrán de la Barra del Trabucador, en mayo de 1988, el número total de muestras fueron 12 (Figura 4.23) cuyo resultados de sus análisis granulométricos se resumen en la tabla de la Figura 4.24 (Peña-CEDEX, 1996)



*Figura 4.23: Localización de la zona de toma de muestras en la barra del Trabucador en 1988
(Fuente: Grassa-CEDEX, 1988)*

DELTA EL EBRO: sedimento en el estrán (mayo de 1988)					
MUESTRA	PLAYA	d50	So	Sk	OBSERVACIONES
4 M	Trabucador-ext.	0'21	0'85	0'71	D,O
8 M	Trabucador-ext.	0'21	1	1	D,O
12 M	Trabucador-ext.	0'21	0'85	0'71	D,O
16 M	Trabucador-ext.	0'21	1	1	D,O
20 M	Trabucador-ext.	0'21	0'85	0'71	D,O
24 M	Trabucador-ext.	0'21	0'85	0'71	D,O
4 B	Trabucador-int.	0'21	1	1	D,O
8 B	Trabucador-int.	0'21	1	1	D,O
12 B	Trabucador-int.	0'21	0'85	0'71	D,O
16 B	Trabucador-int.	0'21	1	1	D,O
20 B	Trabucador-int.	0'21	1	1	D,O
24 B	Trabucador-int.	0'21	1	1	D,O

D= dorado; O= oscuro; C= conchas; MO= materia orgánica; FC= fango consolidado; d50 en mm

Figura 4.24: Resultado del análisis de las muestras en la barra del Trabucador en 1988 d_{50} en mm.; $So=d_{75}/d_{25}$; $Sk=d_{75} \cdot d_{25}/d_{50}^2$ (Fuente: Peña-CEDEX, 1996)

Las muestras tomadas en las playas del Trabucador exterior e interior son muy uniformes, no habiendo variación en su tamaño medio ni desviaciones del mismo. Por lo que se trataría de una arena fina (0,21 mm) muy bien clasificada con muy pocas desviaciones.

4.1.4.2 "Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del delta del Ebro" (Guillén, 1992)

Para la realización de su tesis, hizo una campaña de toma de muestras de sedimento en dos lugares: 1) Recogida en tierra (playas), y 2) Tomadas desde embarcaciones (Figura 4.25). Con todos estos datos caracterizó los sedimentos superficiales de la plataforma costera (Figura 4.11).

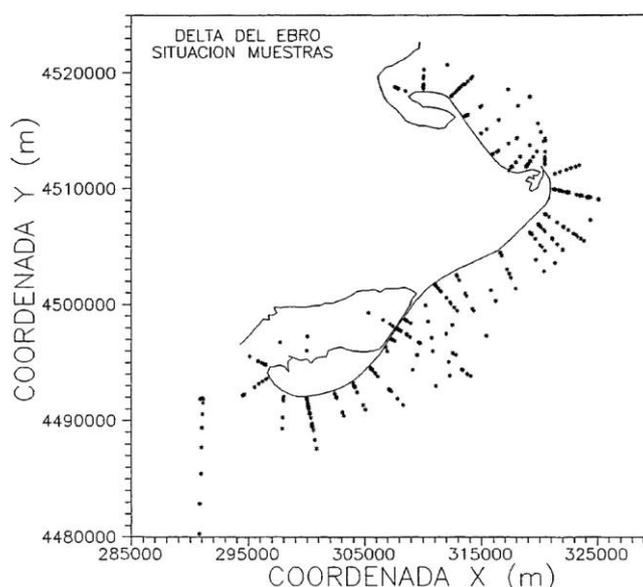


Figura 4.25: Situación de la toma de muestras de Guillén (1992)



CEDEX

Según indica: "se realizaron campañas en distintas épocas del año: Junio y Octubre de 1988, Marzo y Julio 1989, Marzo y Julio de 1990 y Marzo y Julio de 1991. En cada campaña se tomaron unas 150 muestras que posteriormente fueron analizadas para determinar la distribución textural y calcular los parámetros estadísticos. El total de muestras recogidas en la playa es de aproximadamente 1.150". En el mar se tomaron muestras a profundidades comprendidas entre 1,5 y 20 m. "En cada perfil se tomaban cuatro muestras correspondientes a la duna, swash, surco y barra". Por tanto en conjunto es un estudio muy completo desde el punto de vista de la caracterización de sedimentos.

El problema de su análisis es que lo intenta hacer global de la costa del Delta y su plataforma interna y no particulariza para una playa o un tramo de ella. El conjunto de las muestras tomadas en playa dan un valor estadístico de:

- Media: 1,99 Φ
- Desviación típica: 0,36 Φ
- Asimetría: -1,65
- Angulosidad: 13

Lo que da una muestra conjunta de una arena fina, bien clasificada, muy desviada a tamaños gruesos y extremadamente picuda. A continuación lo distingue por zonas, dando los siguientes valores estadísticos (Figura 4.26):

	MEDIA	DESVIACION	ASIMETRIA	ANGULOSIDAD
ZONA 1	2,03	0,36	-1,55	11,4
ZONA 2	1,91	0,35	-1,61	12,5
ZONA 3	1,97	0,37	-1,82	13,5
ZONA 4	1,93	0,34	-1,57	13,0
ZONA 5	2,07	0,38	-1,81	13,2

Figura 4.26: Parámetros granulométricos medios de las cinco zonas del Delta del Ebro (media y desviación típica en unidades phi) (Fuente: Guillén, 1992)

- Zona 1: La Banya (0,24 mm)
- Zona 2: Barra del Trabucador (0,27 mm)
- Zona 3: Playa de Eucaliptos (0,26 mm)
- Zona 4: islas de Buda y San Antonio (0,26 mm)
- Zona 5: Fangar (0,24 mm)

4.1.4.3 "Estudio de la dinámica litoral del delta del Ebro y prognosis de su evolución (dinámica litoral del delta del Ebro) - informe final" (Peña- CEDEX, 1996)

Para caracterizar los sedimentos a lo largo de la línea de costa del delta del Ebro, este informe presenta los resultados de las 15 muestras tomadas en el estrán, los días 14 y 15 de febrero de 1996, de las playas a lo largo de toda la costa exterior del delta del Ebro, y en las playas del Pipi, del Diamante y Arenal, cuyo resumen se muestra en las Figuras 4.27 y 5.28. En ellas se aprecia cómo el valor del tamaño medio de la arena es bastante constante, reduciéndose éste en los extremos continentales.

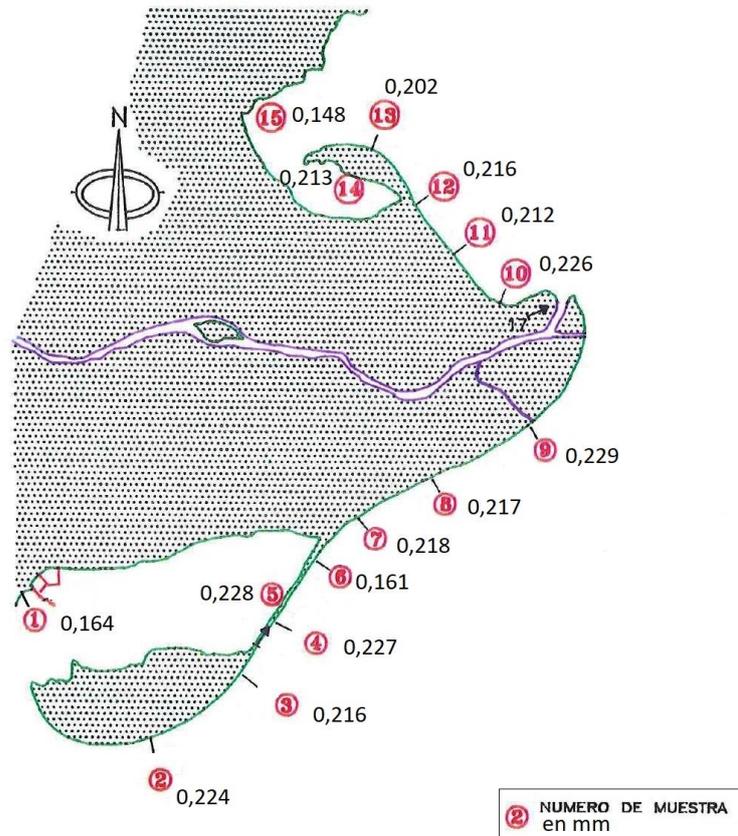


Figura 4.27: Situación y valor de D_{50} de las muestras de arena del Delta en el informe del CEDEX de 1996 (Fuente: Peña-CEDEX, 1996)

DELTA EL EBRO: sedimento en el estrán (14,15-2-1996)					
MUESTRA	PLAYA	d50	So	Sk	OBSERVACIONES
1	Pipi				D, O
2	Costa de Afuera				D, O
3	Tora Larga				D, O
4	Trabucador (ext)				D, O
5	Trabucador (int)				D, O
6	Amposta				D, O
7	Amposta				D, O
8	Platjola				D, O, C
9	Platjola				D, O, C
10	Tramuntano				D, O, C, MO
11	Muntell de Gros				D, O, C, MO
12	Marquesa				FC, D, O, C, MO
13	Marquesa				FC
14	Punta				D, O, C, MO
15	Diamante				D, O
16	Arenal				D, O

D= dorado; O= oscuro; C= conchas; MO= materia orgánica; FC= fango consolidado; d50 en mm.; So= d_{75}/d_{25} ; Sk= $d_{75} \cdot d_{25} / d_{50}^2$

Figura 4.28: Resultado de los análisis de las muestras de arena del informe del CEDEX de 1996 (Fuente: Peña-CEDEX, 1996)



4.1.4.4 "Libre verd de l'estat de les zones costaneres a Catalunya 2010- Tarragona" (CIIRC, 2010) [GENCAT, 2010]

Este trabajo sobre las zonas costeras catalanas fue realizado por el Centre Internacional D'Investigació dels Recursos Costaners (CIIRC), tiene cuatro partes o volúmenes: La primera de ellas, realizada en 2008 son los "Aspectos metodológicos generales", y las otras tres partes se refieren a cada una de las provincias costeras catalanas; siendo la primera de ellas Tarragona que, a su vez, está dividida en seis tramos, siendo el segundo el correspondiente al Delta del Ebro. La costa del Delta la divide en trece partes, siendo éstas, de sur a norte (Figura 4.29):

- 1 Punta de la Banya
- 2 Platja Trabucador)
- 3 Platja Eucaliptus
- 4 Platja de la Platjola
- 5 Platja Serrallo
- 6 Platja del Migjorn
- 7 Platja del Buda
- 8 Platja Sant Antoni
- 9 Embarcador Riu Ebre
- 10 Platja Riumar
- 11 Bassa Arena
- 12 Platja Marquesa
- 13 Platja del Fangar

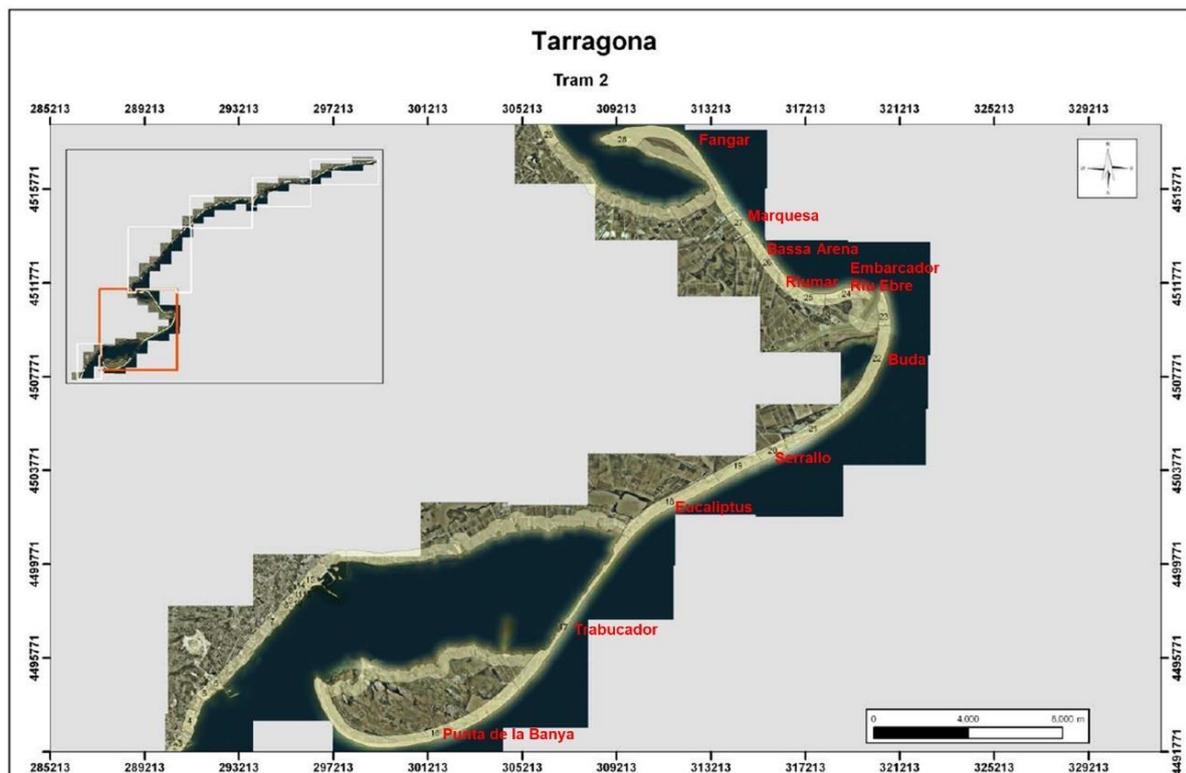


Figura 4.29: Partes de la costa del Delta del Ebro según CIIRC (2010)

Los resultados de los valores del tamaño medio de los sedimentos de las playas se muestran en escala gráfica de colores (Figuras 4.30, 31 y 32).

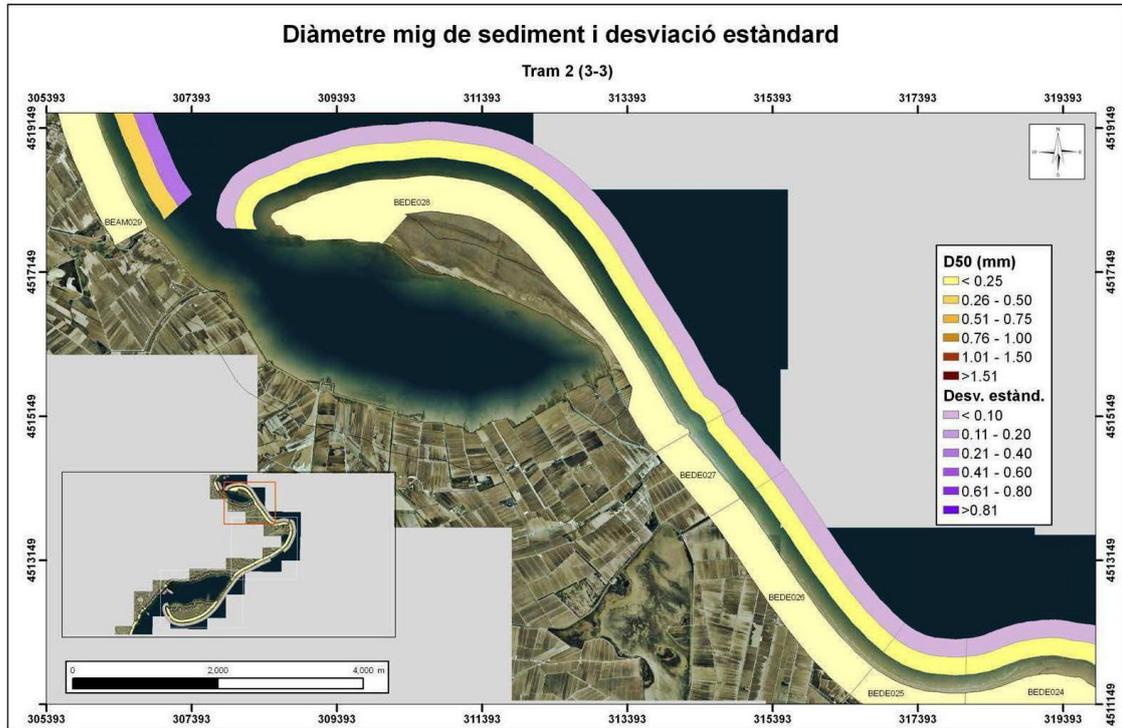


Figura 4.30: Tamaño medio del sedimento de la costa del hemidelta norte (Fuente: CIIRC, 2010)

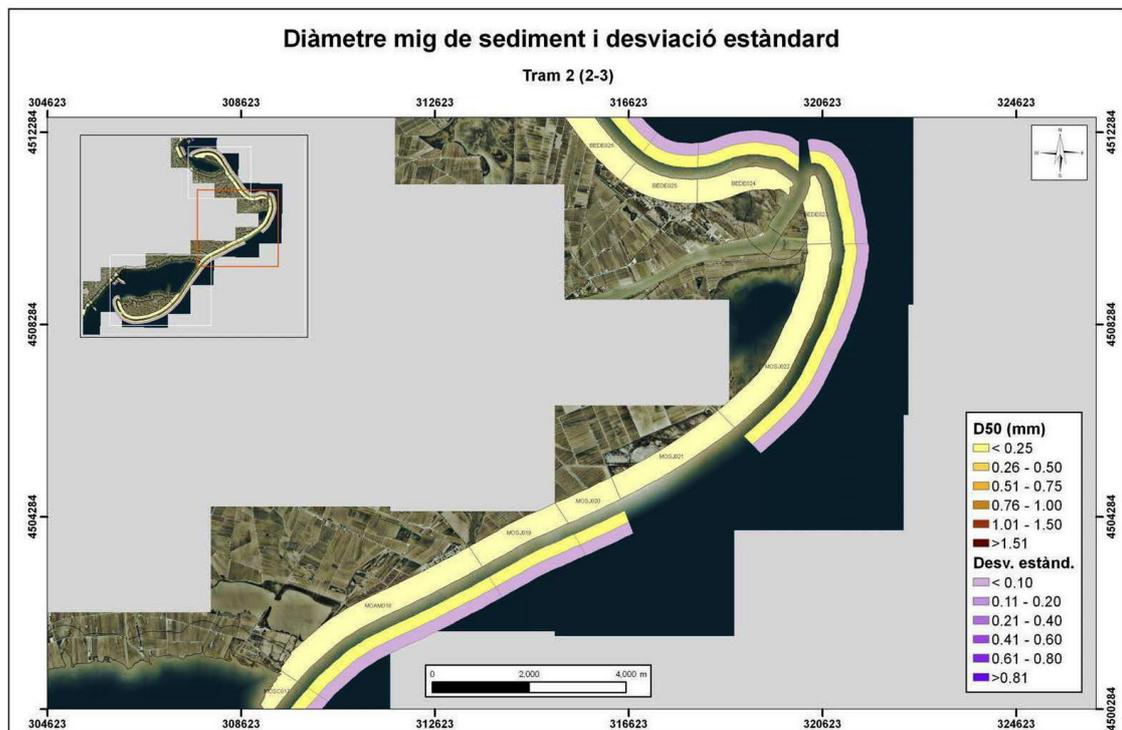


Figura 4.31: Tamaño medio del sedimento de la costa del hemidelta sur y desembocadura (Fuente: CIIRC, 2010)

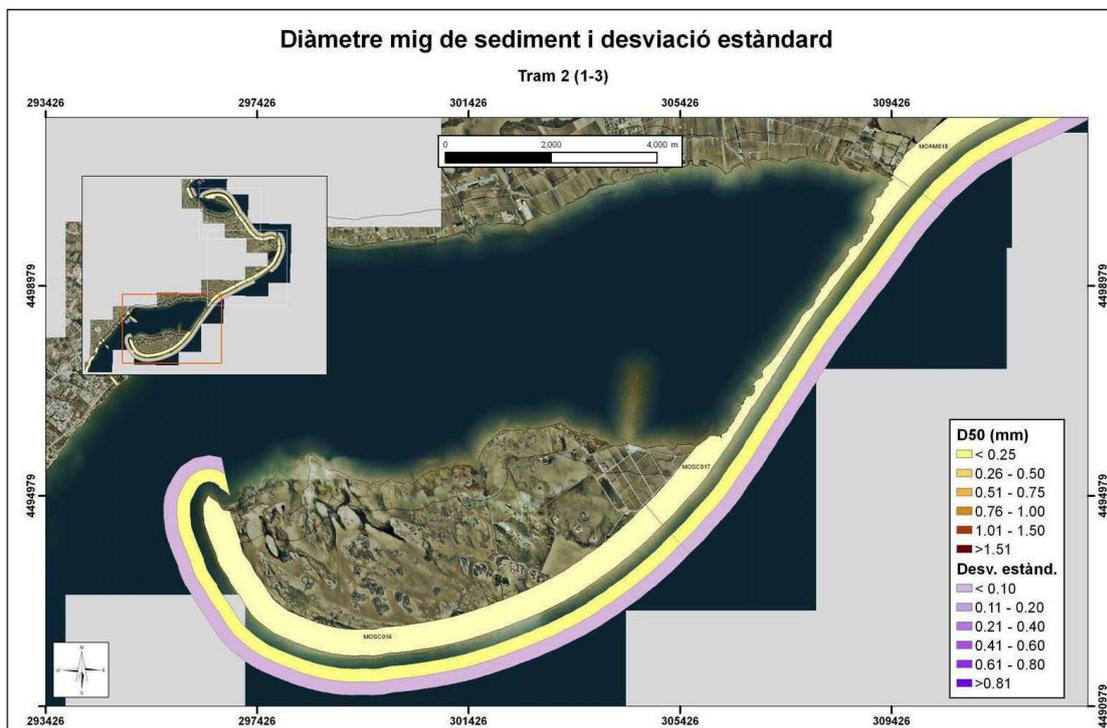


Figura 4.32: Tamaño medio del sedimento de la costa de la Barra del Trabucador y lóbulo de la Banya (Fuente: CIIRC, 2010)

Los valores que muestra este trabajo son similares a los que presentaban los trabajos anteriores, indicando que existe muy poca variación en el tamaño medio de la arena que forma la costa exterior e interior del Delta.

Los detalles de valores medios y desviaciones del tamaño del sedimento en las distintas playas, el mismo estudio (CIIRC, 2010), aporta información al respecto, que ha sido recogida en la Tabla 4.7, a través de fichas de cada playa. La identificación de las playas se puede observar en la Figura 4.29.

Tabla 4.7: Valores del tamaño del sedimento (CIIRC, 2010)		
Playa	D₅₀ (mm)	σ (mm)
Punta de la Banya	0,189	0,036
Trabucador	0,225	0,042
Eucaliptus	0,226	0,044
Serrallo	0,229	0,046
Buda	0,200	0,038
Embarcador Riu Ebre	0,183	0,046
Riumar	0,190	0,051
Bassa Arena	0,208	0,036
Marquesa	0,203	0,038
Fangar	0,206	0,037

4.1.4.5 Resumen de las características de los sedimentos en las playas del Delta

Una vez analizado en conjunto de trabajos que poseen datos sobre las características granulométricas de las playas del Delta del Ebro, se observa que todas ellas están compuestas por arena fina entre 0,3 y 0,189 mm. Siendo una horquilla que puede oscilar estacionalmente y debido a las riadas del Ebro que aporten en un momento determinado más cantidad de tamaños finos que alteren esta, casi, uniformidad de tamaños, acompañado estacionalmente por la alteración que produce el clima de oleaje en un momento dado.

El resumen de los datos que se posee de los tamaños medios de las arenas de las playas del Delta del Ebro se resume en la Figura 4.33.



Figura 4.33: Resumen de los tamaños medios de las arenas de las playas del Delta del Ebro (Foto Google Earth)

4.2 TRANSPORTE SÓLIDO LITORAL

El transporte sólido litoral comprende tanto el transporte a lo largo de la costa, transporte longitudinal de sedimentos, como transversalmente a ella, transporte transversal de sedimentos. El primero de ellos es el responsable principal de las transformaciones que se

producen a lo largo de la línea de costa, mientras el segundo realiza las transformaciones en el perfil de playa moviendo el material. En este apartado se analiza el primero de ellos, el transporte longitudinal de sedimentos, dejando el siguiente que se ocupa de la caracterización del perfil de playa a lo largo del Delta del Ebro para cuando se trate de la consecuencia del segundo de los transportes, el transversal.

Los estudios existentes sobre la caracterización del transporte sólido litoral en el Delta del Ebro son casi todos relativos a la totalidad de la unidad; dando una visión global de los patrones de transporte en las distintas áreas y su interconexión, en su mayoría con el fin de conocer el balance sedimentario del sistema litoral. Pero existen estudios que solamente abordan el transporte de unas zonas concretas dentro del Delta; entre ellos; se pueden encontrar estudios específicos sobre el hemidelta Norte, incluyendo la interacción con el transporte eólico dunar (Barrio-Parra et al., 2017), o sobre la playa del Trabucador (Grassa-CEDEX, 1988).

El primero de estos trabajos (Barrio-Parra et al., 2017) analiza el efecto del transporte longitudinal en la evolución y transformaciones del conjunto de dunas que se producen en todo el hemidelta norte, especialmente en la península del Fangar (Figura 4.34) por el efecto combinado entre el transporte longitudinal de sedimentos y el transporte eólico.

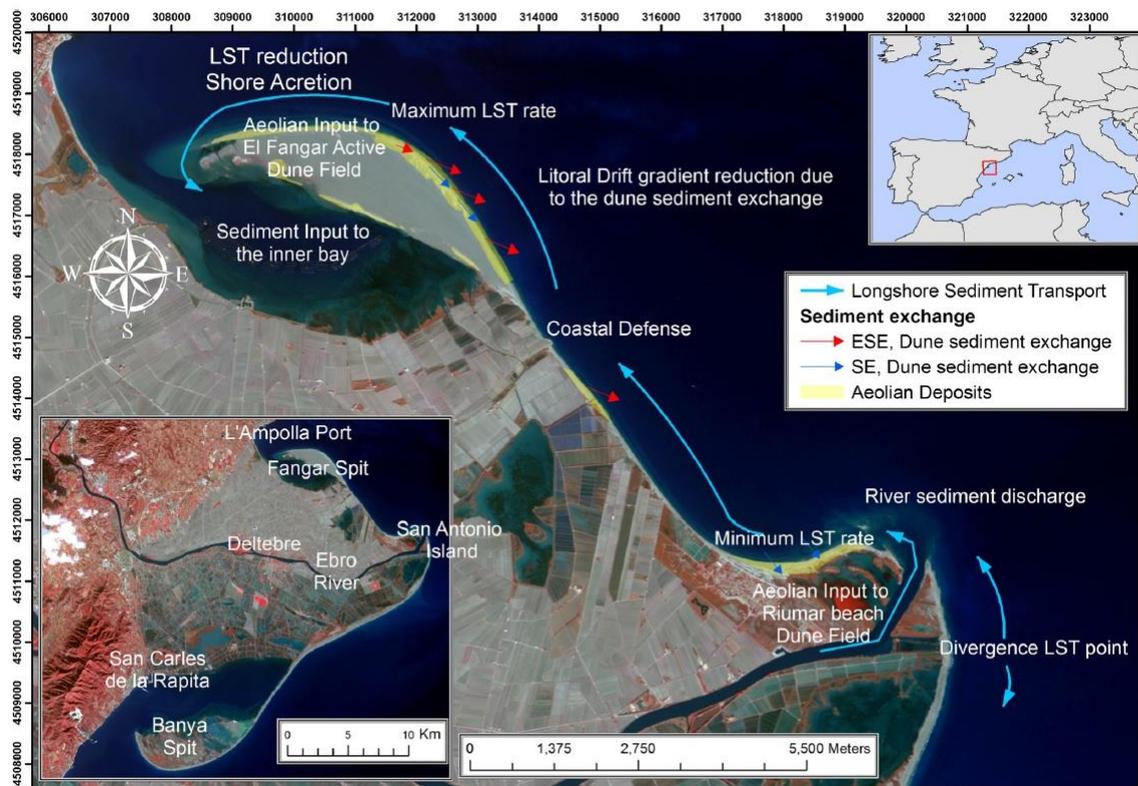


Figura 4.34: Esquema del transporte de sedimentos, tanto debido al transporte longitudinal como al eólico en el hemidelta norte (Fuente: Barrio-Parra et al., 2017)



4.2.1 Tipos de cálculo de transporte longitudinal en todo el Delta

La cuantificación del transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa del Delta del Ebro se ha realizado utilizando tres métodos diferentes, pero complementarios. El primero de ellos responde a su cuantificación mediante formulaciones teóricas, basadas en todos los casos estudiados en el flujo de energía, utilizando para ello el desarrollo propuesto por el CERC con la famosa fórmula que lleva su nombre. Su base fundamental es que la potencia de la energía del oleaje, flujo de energía, que alcanza la costa se utiliza en una determinada proporción para mover las partículas de arena en un zigzag a lo largo de la costa. Y por tanto, si se conoce esta proporción y la energía que cada ola transmite, se puede determinar la cantidad de arena que puede ser movida por ésta. Así se llega a la famosa fórmula del CERC:

$$Q_t = K \frac{\rho \sqrt{g} H_b^{\frac{5}{2}}}{16 (\rho_s - \rho) (1 - p)} \text{sen } 2\alpha_b$$

Siendo: α_b el ángulo del frente de ola en rotura con la costa; H_b la altura de ola en rotura; d_b la profundidad del agua en rotura; g la aceleración de la gravedad; ρ la densidad del agua; κ el índice de rotura (H_b/d_b); ρ_s la densidad del sedimento; p la porosidad del sedimento.

La fiabilidad de los datos obtenidos para que se ajusten a la realidad depende de diversos factores; pero especialmente importante es que el clima de oleaje se corresponda con el real, y que las hipótesis de partida de los modelos sean abstracciones asumibles por las características físicas de la naturaleza (linealidad de las líneas batimétricas, pendientes casi constantes, tamaño del grano, etc.). En general, los valores obtenidos indican la capacidad que tiene el oleaje para mover la arena; si existe arena y las abstracciones hechas están próximas a la realidad, como parece que es el caso de las playas del Delta del Ebro, tanto más próximo a la realidad se encontrará el dato obtenido.

El segundo método utilizado es valerse de los datos de la evolución de la línea de costa. Con él, puede calcularse el transporte longitudinal medio que ha producido la evolución de un estado inicial de la costa al siguiente, conociendo la profundidad de cierre en el lugar. Para ello se aplica la ecuación de continuidad:

$$(d_c + d_B) \Delta y \Delta x = -Q \Delta t \pm q \Delta x \Delta t$$

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{1}{d_c + d_B} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta x} \pm q \right) = 0$$

También denominada ecuación del balance de sedimento, porque se hace el balance sedimentario en una superficie S determinada de playa, en la que: Q = tasa de transporte longitudinal; d_c = profundidad de cierre; d_B = altura de la berma; q = fuente o sumidero de sedimento; t = tiempo; Δx = incremento de playa; $e \Delta y$ = incremento de anchura playa.

Por tanto si se conocen estos datos en un periodo de tiempo determinado; para cada tramo se calcula las áreas de aumento o erosión entre dos líneas de costa de diferentes años, $S_{(i-1, i)}$. Y el volumen que varía en cada tramo de costa, $Vol_{(i-1, i)}$, para un cambio de superficie de playa $S_{(i-1, i)}$, viene dado por el valor de esta superficie multiplicado por la profundidad de cierre más la altura de la berma (d_c+d_B) y dividido por el número de años. Aplicando la ecuación anterior daría:



CEDEX

$$S_i = S_{i+1} - \frac{\Delta x}{\Delta t} (d_B + d_c) \Delta y$$

El transporte longitudinal. Una vez conocida la variación de volumen para cada tramo, y considerando las condiciones de contorno, el transporte longitudinal que sale de cada tramo vendrá representado por:

$$Q_i = Q_{i-1} + \sum \frac{Vol_{i-1,i}}{t}$$

El tercero de los métodos consiste en analizar las formas que el delta tiene en su conjunto para determinar el estado evolutivo y la relación de transportes; en muchas de las ocasiones este cálculo es introductorio a los otros dos, especialmente el segundo. Normalmente no calcula la tasa de transporte, sino que determina la relación de transportes y determina cualitativamente su capacidad.

4.2.2 Trabajos que determinan el transporte longitudinal de sedimentos

Los trabajos más relevantes que determinan el transporte longitudinal de sedimentos, por alguno de los dos métodos indicados, ordenados cronológicamente, son:

1. “Estudio sobre la regeneración de la playa del Trabucador” (Grassa-CEDEX, 1988)
2. “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario” (Jiménez et al.-GENCAT, 1990)
3. “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario a partir de tendencias evolutivas de la línea de orilla” (Jiménez y García-GENCAT, 1991)
4. “Estudio de la regresión del Delta del Ebro y propuesta de alternativas de actuación” (IBERINSA, 1992)
5. “Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del Delta del Ebro” (Guillén, 1992)
6. “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario y esquemas de transporte” (Jiménez et al.-GENCAT, 1992)
7. “Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain” (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993)
8. “Estudio de la dinámica litoral del delta del Ebro y prognosis de su evolución (dinámica litoral del delta del Ebro) - informe final” (Peña-CEDEX, 1996)
9. “Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro” (LIM-UB, 2000)
10. “Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña. Número 1: el Delta del Ebro. Documento de síntesis” (GENCAT, 2008)



11. "Llibre verd de l'Estat de la zona costanera a Catalunya. Tarragona" (CIIRC, 2010)
12. "Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión de la desembocadura y cauce inferior del río en el delta del Ebro (Tarragona)" (IHAC-UC, 2011)
13. "Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero del Delta del Ebro" (LIM, 2011)

Los trabajos que determinan el transporte longitudinal de sedimentos, capacidad del transporte, mediante formulaciones teóricas son:

- Grassa-CEDEX (1988)
- IBERINSA (1992)
- Guillén (1992)
- Jiménez et al. (1992)
- Peña-CEDEX (1996)
- CIIRC (2010)
- IHAC-UC (2011)

Los trabajos que determinan el transporte longitudinal de sedimentos mediante la evolución de la línea de costa son:

- Jiménez et al.-GENCAT (1990)
- Jiménez y García-GENCAT (1991)
- Jiménez y Sánchez-Arcilla (1993)
- LIM-UB (2000)
- GENCAT (2008)
- LIM (2011)

El análisis de la forma morfológica del Delta y su relación con el transporte se realiza en casi todos los trabajos; analizándolo de manera cualitativa Peña-CEDEX (1996).

Gran parte de los datos sobre el transporte de sedimentos se han ido mostrando en el apartado de "Estudios recientes" y algún otro en el apartado dedicado a "Sedimentos". No obstante, resulta necesario realizar un balance general de todos ellos, aunque se procurará no ser repetitivo. El apartado final muestra el resumen y conclusiones del análisis de todos estos trabajos, no siendo necesario realizar ningún estudio ni cálculo adicional ya que la caracterización del transporte de sedimentos a lo largo de la costa del Delta del Ebro está perfectamente bien determinada.

4.2.2.1 "Estudio sobre la regeneración de la playa del Trabucador" (Grassa-CEDEX, 1988)

El estudio que se realizó en el CEDEX por encargo de la Dirección General de Puertos y Costas en 1988 con el fin de analizar la posible regeneración de la Barra del Trabucador; conllevó una campaña de toma de muestras de sedimentos, que se ha mostrado en el



apartado dedicado a ello, y la determinación de la capacidad del transporte sólido litoral longitudinal a lo largo del hemidelta sur, mediante la fórmula del CERC, utilizando para ello los datos de oleaje que proporcionaba en banco de datos visuales de oleaje. El resultado de este cálculo se muestra en la tabla (4.8).

Tabla 4.8: Transporte longitudinal de sedimentos en el hemidelta sur (Grassa-CEDEX, 1988)				
Zona	Transporte (m³/año)	bruto	Transporte (m³/año)	neto
Extremo NE Delta	681.000		453.000	
Al NE del Trabucador	587.000		253.000	
Playa Trabucador (extremo NE)	623.000		379.000	
Playa Trabucador (extremo SW)	691.000		447.000	
Alfaques	730.000		387.000	
Alfaques (al SW)	500.000		191.000	
Alfaques (más al SW)	199.000		43.000	

Debe entenderse en esta tabla Alfaques como península de la Banya.

4.2.2.2 “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario” (Jiménez et al.-GENCAT, 1990)

Este informe se realizó dentro del gran proyecto promovido por la Generalitat de Catalunya, a través de la Direcció General de Port i Costes (apartado 1.3.4). En este informe se estudia la respuesta de la línea de costa en el periodo 07/88-06/89 dividiendo el Delta en varios sectores y sus respectivos perfiles y, a partir de dicho análisis, se evalúa el balance de sedimentos, mediante la evolución de la costa (acumulación-erosión)

Para el cálculo de las tasas de transporte en cada tramo entre perfiles se resuelve utilizando inversamente la ecuación de continuidad aplicada al transporte longitudinal, imponiendo una condición de contorno en uno de los extremos de la costa, siendo la condición de contorno entre sectores que no sale sedimento. En la Figura 4.35 se muestra una composición de las tres figuras que acompañan al estudio, donde se puede apreciar las condiciones de contorno citadas anteriormente para la zona de la desembocadura.

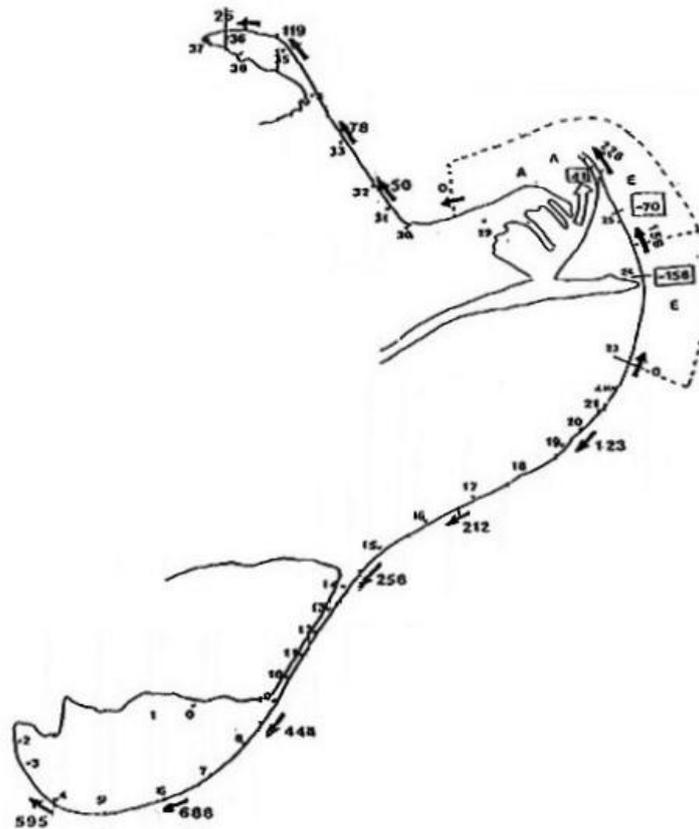


Figura 4.35: Transporte de sedimentos longitudinal a lo largo del Delta del Ebro, en una composición de figuras del, esquemas de transporte longitudinal y balance sedimentario en el período 07/88-06/89 (Fuente: Jiménez et al.-GENCAT, 1990)

4.2.2.3 “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario a partir de tendencias evolutivas de la línea de orilla” (Jiménez y García-GENCAT, 1991)

Este trabajo es una continuación del anterior y sigue la misma metodología, pero ahora definen unas zonas que serán las que se seguirán utilizando en los sucesivos trabajos que sobre el Delta del Ebro ha ido realizando el LIM, tanto para la Generalitat de Catalunya como para la Dirección General de la Costa y el Mar. El periodo que se utilizó para observar la evolución de cada uno de los tramos estaba comprendido entre abril de 1988 y marzo de 1991. Los resultados de los cálculos se muestran en las Figuras 4.36 y 4.37.

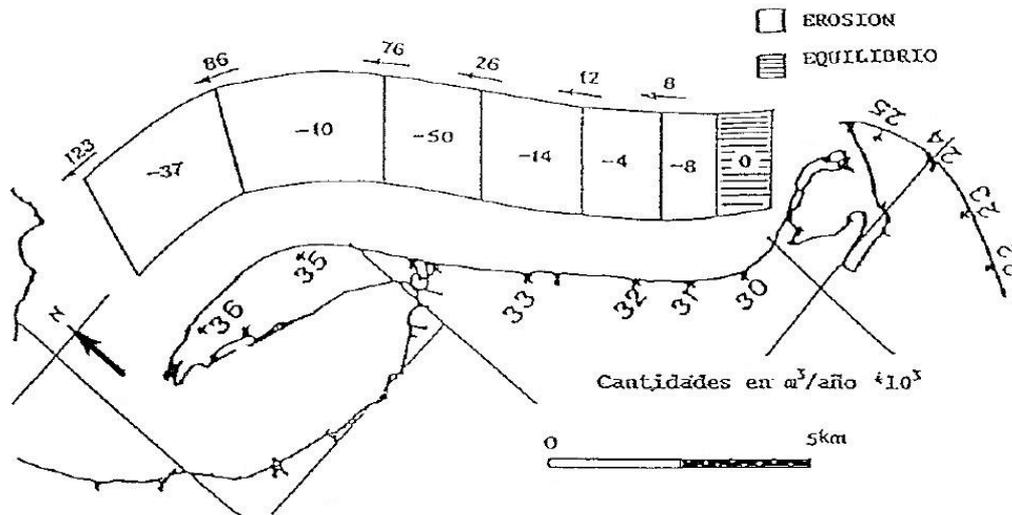


Figura 4.36: Resultado del balance sedimentario y transporte longitudinal de sedimentos en el hemidelta norte usando la evolución de la costa entre 1988 y 1991 (Fuente: Jiménez y García-GENCAT, 1991)

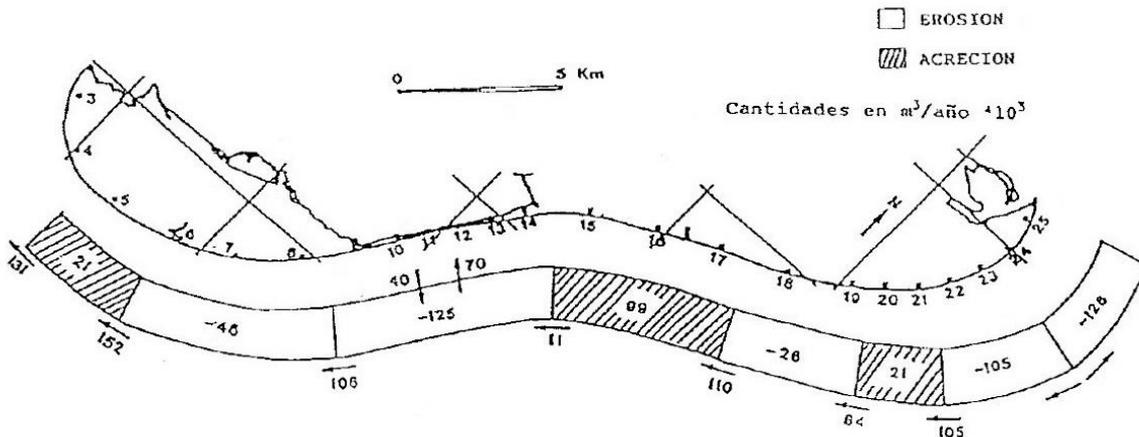


Figura 4.37: Resultado del balance sedimentario y transporte longitudinal de sedimentos en el hemidelta sur usando la evolución de la costa entre 1988 y 1991 (Fuente: Jiménez y García-GENCAT, 1991)

4.2.2.4 “Estudio de la regresión del Delta del Ebro y propuesta de alternativas de actuación” (IBERINSA, 1992)

El estudio de la consultora IBERINSA realizado para la Dirección General de Puertos y Costas para analizar la regresión que se producía en la costa del Delta del Ebro y analizar las posibles soluciones a ella, determinaba el transporte de sedimentos a lo largo de la costa mediante formulaciones teóricas y comparaba sus resultados con trabajos anteriores del CEDEX (1988) y Jiménez et al. (1991) (Figura 4,38).

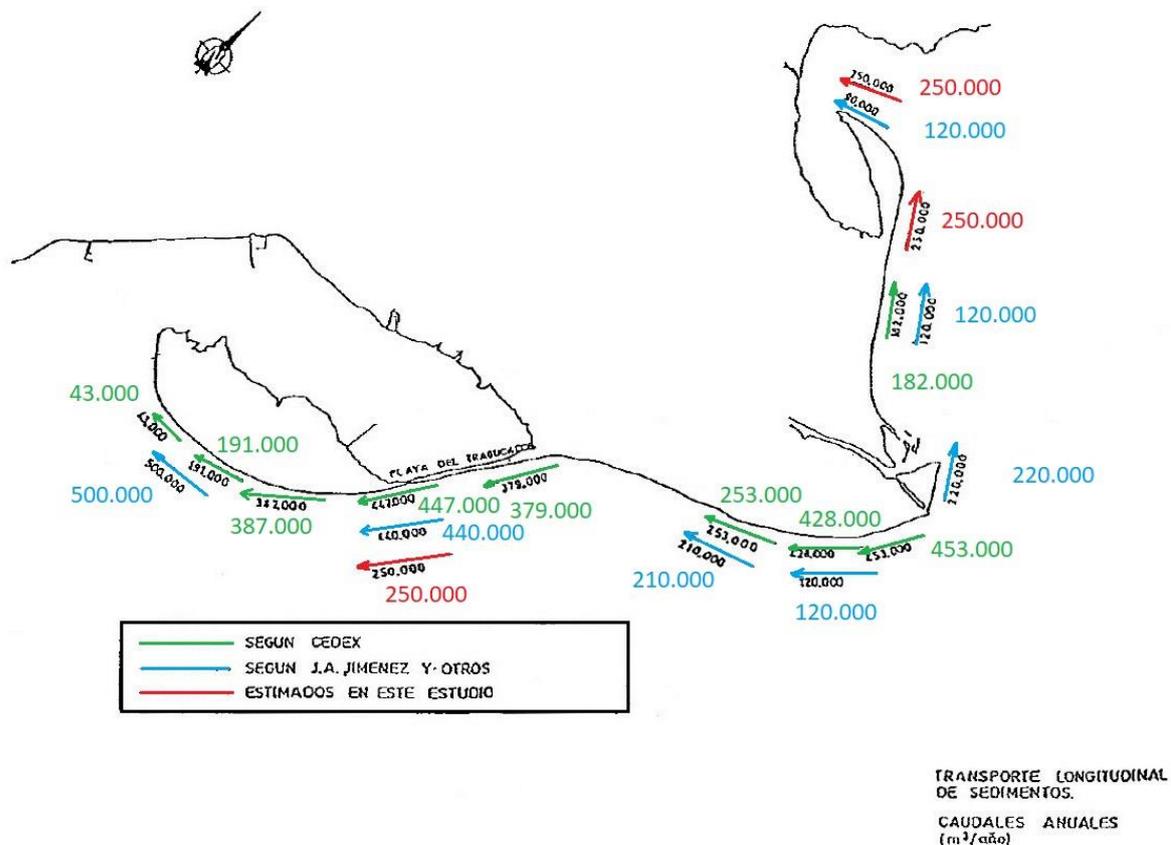


Figura 4.38: Transporte longitudinal de sedimentos en el informe de IBERINSA, donde se ha retocado para una mejor visión (Fuente: IBERINSA, 1992)

4.2.2.5 “Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del Delta del Ebro” (Guillén, 1992)

La tesis de Guillen, en su capítulo XII, determina la capacidad de transporte longitudinal de sedimentos, aplicando la fórmula del CERC con los coeficientes de 1984. El autor señala que los resultados solo deben ser considerados desde el punto de vista cualitativo, ante la necesidad de un análisis más detallado para la caracterización cuantitativa del transporte litoral.

Se tienen en cuenta las variaciones en la dirección del oleaje y su persistencia así como los coeficientes de refracción en cada perfil. La ubicación de los perfiles considerados en el estudio se muestra en la Figura 4.39.

El transporte longitudinal de sedimentos se calcula en cada uno de los perfiles como la suma del producido por todos los oleajes incidentes. En las Figuras 4.40 y 4.41 se muestran los valores para cada uno de los puntos a lo largo de la costa del Delta del Ebro para cada tipo de oleaje considerado. Así analiza la importancia de cada una de las direcciones de oleaje en cada tramo y por tanto su influencia en la modelación del Delta.



CEDEX

PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

Anejo 5. Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro

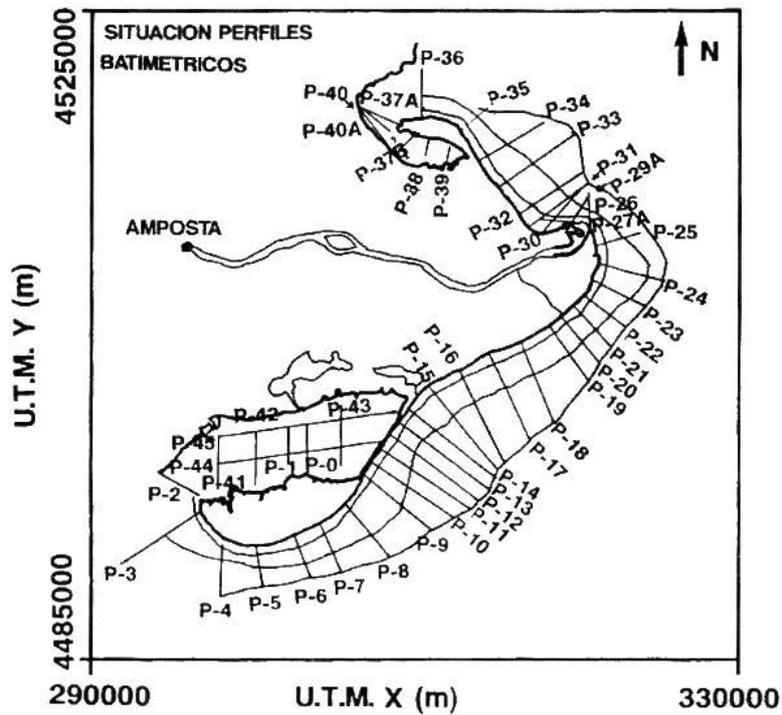


Figura 4.39: Perfiles topo-batimétricos tomado por Guillén (Fuente: Guillén, 1992)

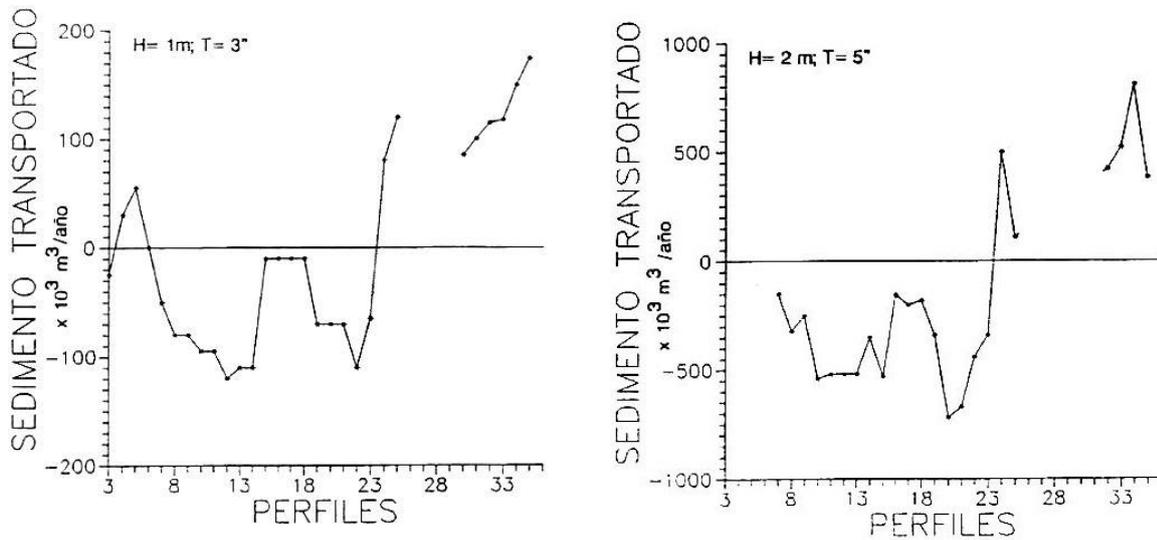


Figura 4.40: Capacidad de transporte longitudinal de sedimento considerando clima con dos oleajes (Valores positivos: sentido NO/ negativos: SO) (Fuente: Guillén, 1992)

Se indica, además, que el control del transporte viene dado principalmente por el oleaje del Este, como se puede ver en la representación gráfica de la influencia de las cuatro direcciones principales del oleaje (N, NE, E y SO) para el oleaje medio (Figura 4.41).

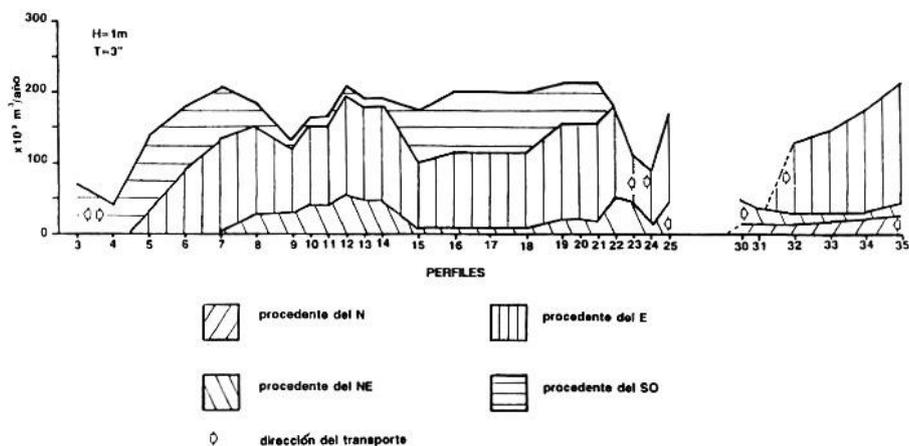


Figura 4.41: Capacidad de transporte longitudinal para las direcciones principales de oleaje en el Delta del Ebro. (Fuente: Guillén, 1992)

4.2.2.6 "Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario y esquemas de transporte" (Jiménez et al.-GENCAT, 1992)

Este trabajo se enmarcaba dentro del conjunto de estudios realizados para la Generalitat de Catalunya sobre el Delta del Ebro. En él se determinó la capacidad del transporte de sedimentos a lo largo de las playas del Delta; utilizando para ello las fórmulas de transporte de Bailard (1981) y la del CERC. El resultado se muestra en la Figura 4.42.

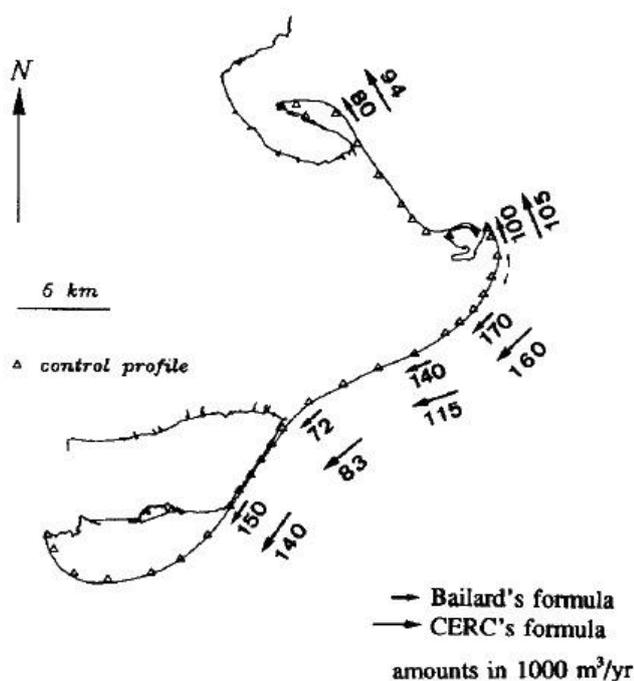


Figura 4.42: Determinación de la capacidad de transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de las playas del Delta del Ebro utilizando las fórmulas de Bailard y CERC (Fuente: Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993)

4.2.2.7 “Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain” (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993)

En el estudio “Medium-term coastal response at the Ebro Delta” (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993) los autores calculan el transporte neto a lo largo de la costa a través de los cambios en los volúmenes de material que, a su vez, se han obtenido por conversión de los desplazamientos de la línea de orilla medidas a través de fotografías aéreas y campañas de campo, cubriendo un periodo de 35 años (1957-1992). Los resultados los presentaron en dos Figuras (4.43 y 4.44).

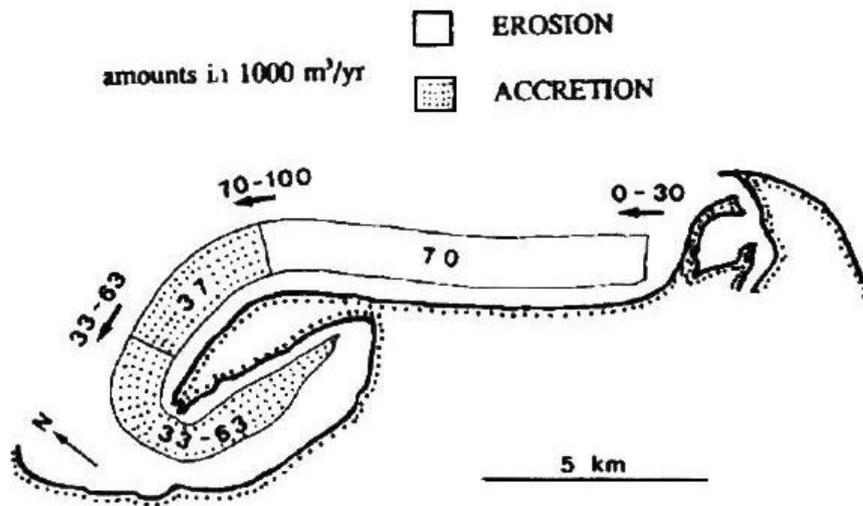


Figura 4.43: Transporte longitudinal de sedimentos y balance sedimentario del hemidelta norte (Fuente: Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993)

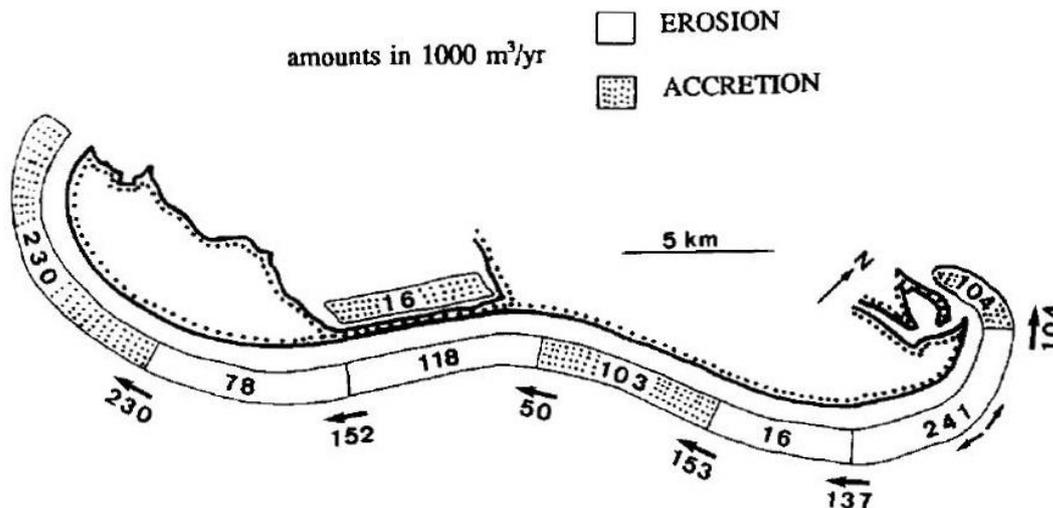


Figura 4.44: Transporte longitudinal de sedimentos y balance sedimentario del hemidelta sur (Fuente: Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993)

4.2.2.8 “Estudio de la dinámica litoral del delta del Ebro y prognosis de su evolución (dinámica litoral del delta del Ebro) - informe final” (Peña-CEDEX, 1996)

El informe del CEDEX (Peña, 1996) aplica dos métodos para la caracterización del transporte longitudinal de sedimentos:

1. El análisis de la morfología o caracterización cualitativa.
2. El cálculo teórico en base al clima de oleaje, diferenciando entre transporte por arrastre y por suspensión.

EVIDENCIAS MORFOLÓGICAS DEL TRANSPORTE SOLIDO LITORAL

A través de información incluida en el informe, recabada de estudios anteriores y de la visita técnica del CEDEX, se analizó la configuración de la costa, la existencia de puertos, defensas, espigones y diques exentos así como el ángulo de las flechas costeras, que puede indicar la dirección del transporte. Algunos de los efectos en puertos y espigones son la acumulación de sedimentos aguas arriba de la corriente sólida y la erosión detrás de ellos. El esquema de transporte que se obtuvo tras el análisis morfológico es el que muestra la Figura 4.45.

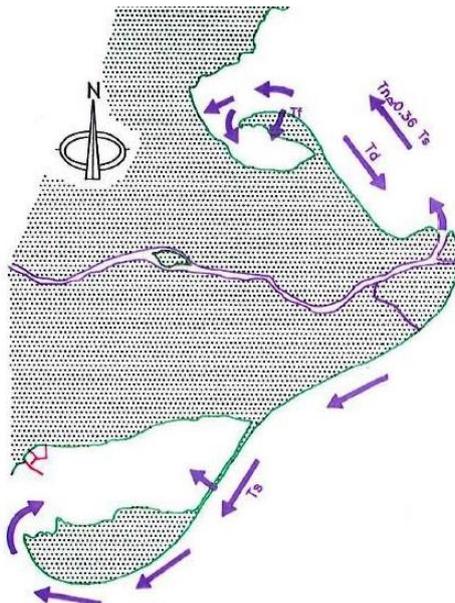


Figura 4.45: Evidencias morfológicas del transporte sólido litoral (Fuente: Peña-CEDEX, 1996)

Del contenido del informe a este respecto se destacan las siguientes ideas (cita textual):

- En cuanto a la configuración geométrica del Delta, desarrolla una forma casi triangular con eje este-oeste y se observa una desproporción entre su desarrollo hacia el Norte y hacia el Sur, siendo este último mayor. Al cambiar la desembocadura de lugar, se ha originado una flecha en dirección NE que ha afectado a la dirección del transporte litoral, con difracción de los oleajes y cambio del sentido del transporte en las playas de Muntell de Gros y Marquesa, según se constató en la visita técnica.



- En la península del Fangar se dan ciclos donde las cadenas dunares existentes son destruidas por los temporales por elevación del mar, pasando a llanuras de cota muy baja, formándose de nuevo sobre ellas las dunas y así sucesivamente. El material de las dunas se acumula en el embarcadero del Fangar.

CÁLCULO TEÓRICO

Para el cálculo teórico del transporte longitudinal de sedimentos se utilizó la fórmula basada en el flujo de energía del CERC.

Se tomaron varios supuestos en relación a la batimetría rectilínea y paralela a la línea de costa, uso de la teoría lineal y criterio de rotura de MacCowan para el oleaje. Al no tenerse en cuenta las distintas direcciones de los frentes del oleaje a gran distancia se llevó a cabo una propagación en esas direcciones para aplicar una corrección.

El cálculo se determinó en siete zonas:

- Playa de la Marquesa
- Playa Tramuntano
- Playa Isla de San Antonio
- Playa Buda-Norte
- Playa Buda-Sur
- Playa Ampolla o Eucaliptus
- Playa Trabucador-Norte
- Playa Trabucador-Sur

Posteriormente se hace una serie de matizaciones y correcciones. Se indica que la fórmula da el valor de la capacidad máxima de transporte del oleaje, no la capacidad real. Además, prosigue diciendo que no existen datos suficientes de oleaje medidos por la boya y, por ello se analizan las distintas direcciones de oleaje con otros datos. También se corrige la reducción de la agitación por la sombra de las islas Columbretes en el lóbulo Sur.

Tras aplicar las correcciones correspondientes, se obtienen los siguientes resultados:

- En la zona Norte: 145.000 m³/año (bruto)/ 130.000 m³/año (neto)
- En el cabo Tortosa:
 - o Dirección Norte (San Antonio): 257.100 m³/año (bruto) / 50.200 m³/año (neto)
 - o Dirección Sur (playa Buda): 557.800 m³/año (bruto) / 148.800 m³/año (neto)
- En la zona Sur:
 - o Transporte neto casi nulo
 - o Transporte bruto: 486.900 m³/año en Playa Sur de Buda / 379.200 m³/año en Playa Amposta o Eucaliptus
 - o Flecha y lóbulo Sur:
 - Corregidos para direcciones sur: 393.600 - 347.300 m³/año (bruto) / 159.500 - 98.900 m³/año (neto)
 - Resto direcciones: 460.600-414.400 m³/año (bruto) / 77.000 - 51.800 m³/año (neto)

CALCULO TEÓRICO EN ARRASTRE Y SUSPENSIÓN

- El cálculo del transporte en suspensión y arrastre se realiza según el método de Bailard (1984) para las playas de San Antonio e Isla de Buda, en las que se divide el Cabo Tortosa.
- Aplicando las correcciones que se tuvieron en cuenta para el transporte a lo largo de la costa, se obtuvieron como resultados los que se presentan en la Tabla 4.9.

Playa	Arrastre		Suspensión	
	Bruto	Neto	Bruto	Neto
San Antonio	37,2	-14,6	183,8	-35,6
Isla de Buda	76,6	5,8	481,2	142,9

CALCULO POR EVOLUCIÓN DE LA COSTA

En este informe se analizó la evolución de las líneas de costa a lo largo del tiempo que contenía el informe del CEDEX de 1979 "Dinámica litoral de las costas mediterránea y onubense. Provincias de Tarragona, Castellón y Valencia". Tomándose siete tramos de costa. La comparación de las diferentes líneas en estos tramos determinó la variación superficial anual y media anual de ellos que se muestra en la Tabla 4.10.

Tramo	Longitud (m)	Periodo (años)			Media anual
		1947-57	1957-73	1973-77	
1) Playa Isla San Antonio	2.845	-58.269	-30.988	-5.150	-37.167
2) Playas Tramuntano, Muntell de Gros y Marquesa	8.569	-30.476	-9.227	-36.368	-15.313
3) Punta del Fangar	3.300	2.596	4.486	7.381	4.192
4) Playa Isla de Buda	5.610	-48.607	-72.773	-65.286	-63.612
5) Playa Amposta y Platjola	10.200	1.019	24.336	15.327	15.281
6) Playa Trabucador	5.600	-34.083	-144	-7.259	-12.597
7 Península de la Banya	12.600	-	-36.601	20.499	22.148

Del análisis de las variaciones superficiales se deducía que había tres zonas de acumulación: Puerto de Alfaques, Embarcadero del Fangar (que se constata por comparación de batimetrías históricas) y la zona sur del Delta en las playas de Platjola y Amposta (Eucaliptus).

También se constataba a partir de estos resultados y las evidencias morfológicas, el cambio de sentido del transporte en la zona Norte.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON ESTUDIOS ANTERIORES

En el último apartado dedicado al transporte sólido litoral a lo largo del Delta del Ebro se presentaron los diversos cálculos del transporte sólido litoral que había aparecido en otros estudios, junto a los resultados a los que se ha estimado en este estudio, habiendo preferido

poner tanto aquella capacidad de transporte sólido litoral estimada sin tener en cuenta la reducción de la agitación por efecto de las islas Columbretes y teniéndolo en cuenta esta reducción en la agitación. Todo ello se resumió gráficamente como muestra la Figura 4.46.

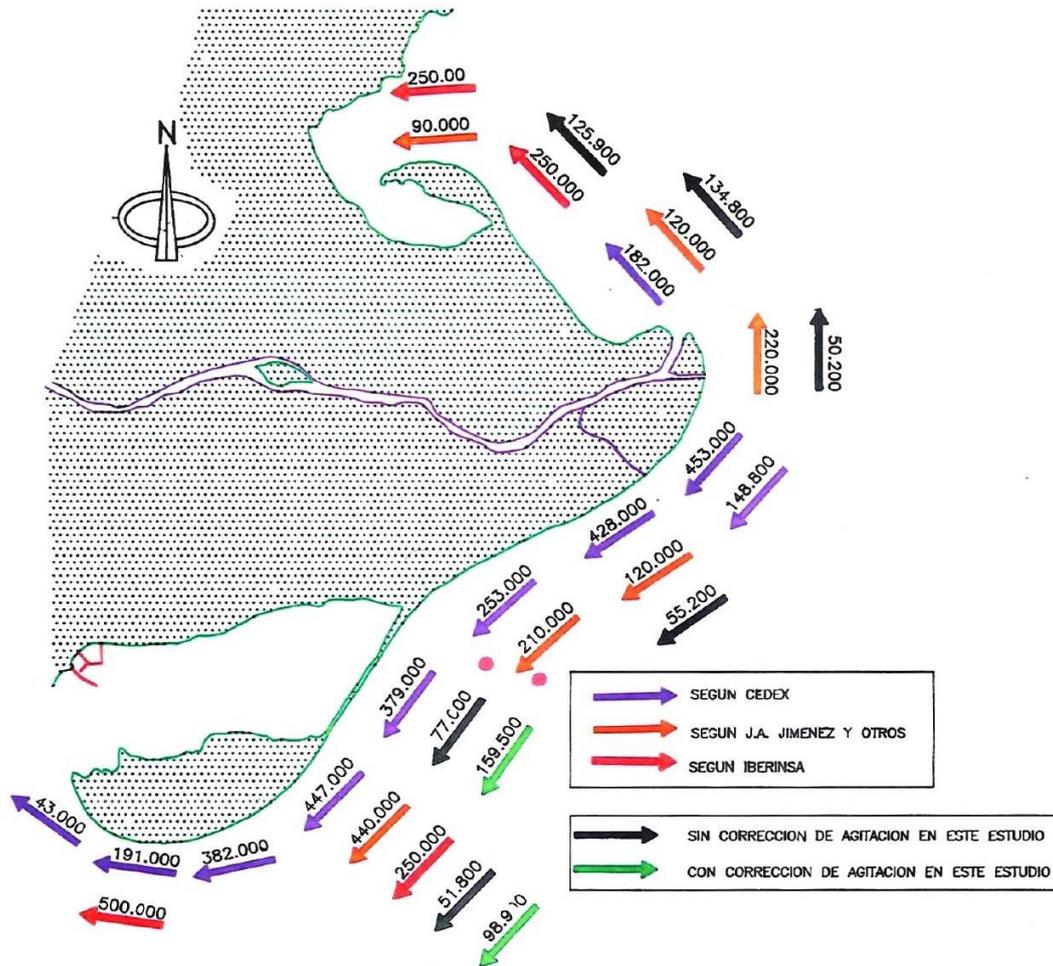


Figura 4.46: Transporte sólido litoral longitudinal estimado en diferentes estudios (Fuente: Peña-CEDEX, 1996)

Como puede apreciarse, se produce una gran disparidad en los resultados de los cálculos de transporte longitudinal.

4.2.2.9 "Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro" (LIM-UB, 2000)

Este estudio y sus apartados han sido comentados ampliamente en el primero de los capítulos dedicado a estudios recientes. El análisis que se hace en él del transporte sólido litoral longitudinal se basa en la evolución de la costa, como anteriormente habían hecho en los años 1991 y 1993; puliendo en cada uno de estos trabajos el resultado del transporte. El que se obtiene en este trabajo se muestra en las Figuras 2.2 y 2.12, y para mayor concreción sus resultados del transporte longitudinal se reproducen en la Figura 4.47.

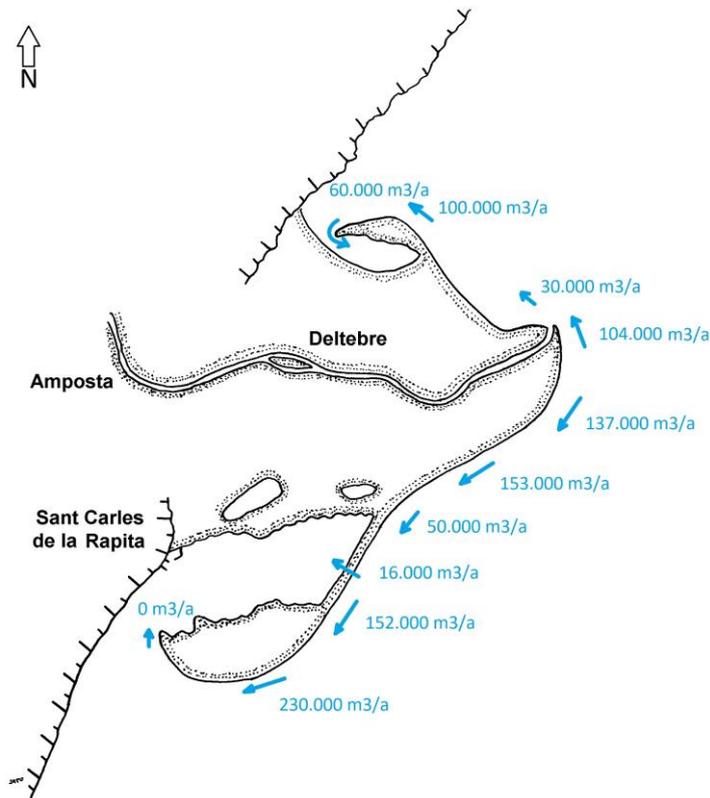


Figura 4.47: Transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de las playas del Delta del Ebro según LIM-UB (2000)

Como se puede apreciar, estos datos son básicamente los mismos que presentaron Jiménez y Sánchez-Arcilla en 1993 (apartado 4.2.2.7).

4.2.2.10 “Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña. Número 1: el Delta del Ebro. Documento de síntesis” (GENCAT, 2008)

El trabajo del Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya que ha sido analizado en el capítulo 2 en trabajos recientes, contiene los datos del transporte longitudinal de sedimentos, aplicando para su cálculo la evolución de la costa, con el mismo método utilizado por el LIM; pero los resultados a los que llegan son algo diferentes (Figura 2.26), que como se ha hecho en el caso anterior para mayor concreción sus resultados del transporte longitudinal se reproducen en la Figura 4.48.

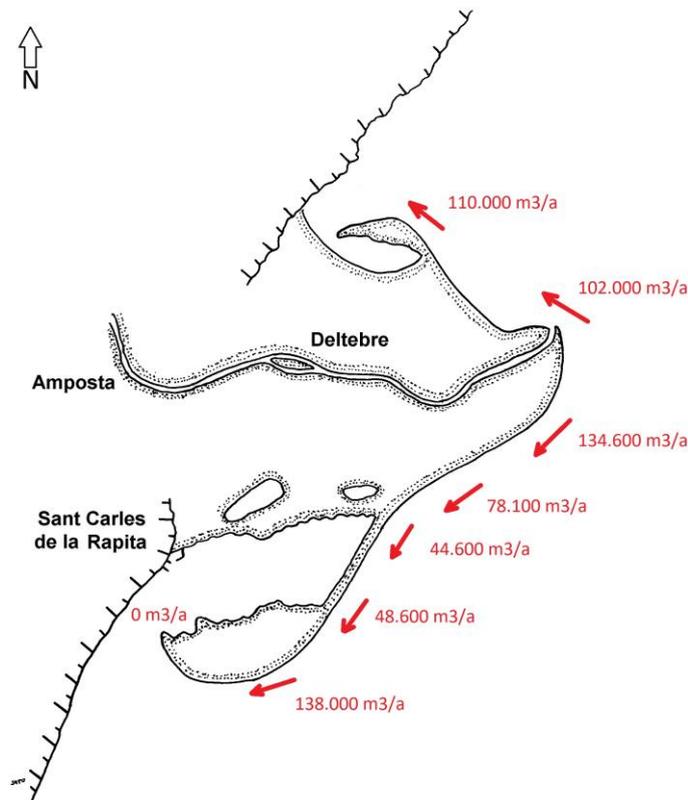


Figura 4.48: Transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de las playas del Delta del Ebro según GENCAT (2008)

También este estudio supone que no entra material a la bahía de los Alfaques, como lo hacen los trabajos anteriores del LIM. Pero, tampoco contempla el trasvase de sedimento a través de la Barra del Trabucador.

4.2.2.11 “Libre verd de l’Estat de la zona costanera a Catalunya. Tarragona” (CIIRC, 2010)

Las tasas de transporte longitudinal en el estudio ‘Estado de la Zona Costera de Cataluña’ (CIIRC, 2008) han sido calculadas para la costa de la provincia de Tarragona de dos formas: con el modelo de Kamphuis (Figura 4.49) y con el modelo del CERC con el coeficiente de calibración ajustado para la granulometría de cada tramo de costa (Figura 4.50).

Al comparar los resultados en las Figuras 4.49 y 4.50 se observa que los signos de las tasas coinciden (sentido del transporte) aunque las tasas calculadas con el modelo del CERC son bastante mayores que las calculadas con el modelo de Kamphuis.

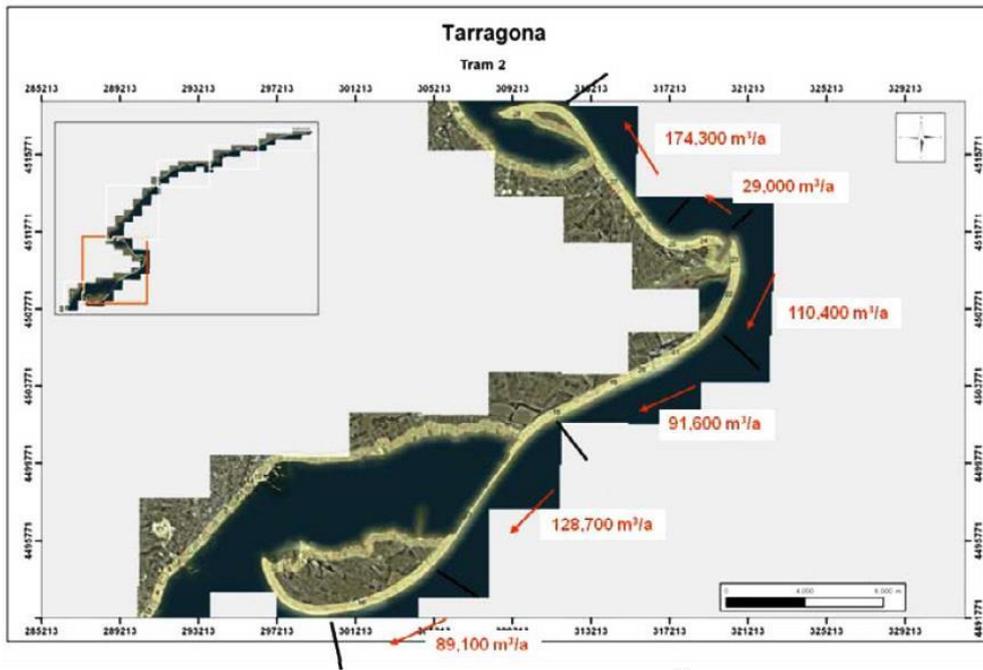


Figura 4.49: Tasas de transporte longitudinal neto ($m^3/año$) estimados con el modelo de Kamphuis para el tramo del Delta del Ebro (Fuente: CIIRC, 2008)

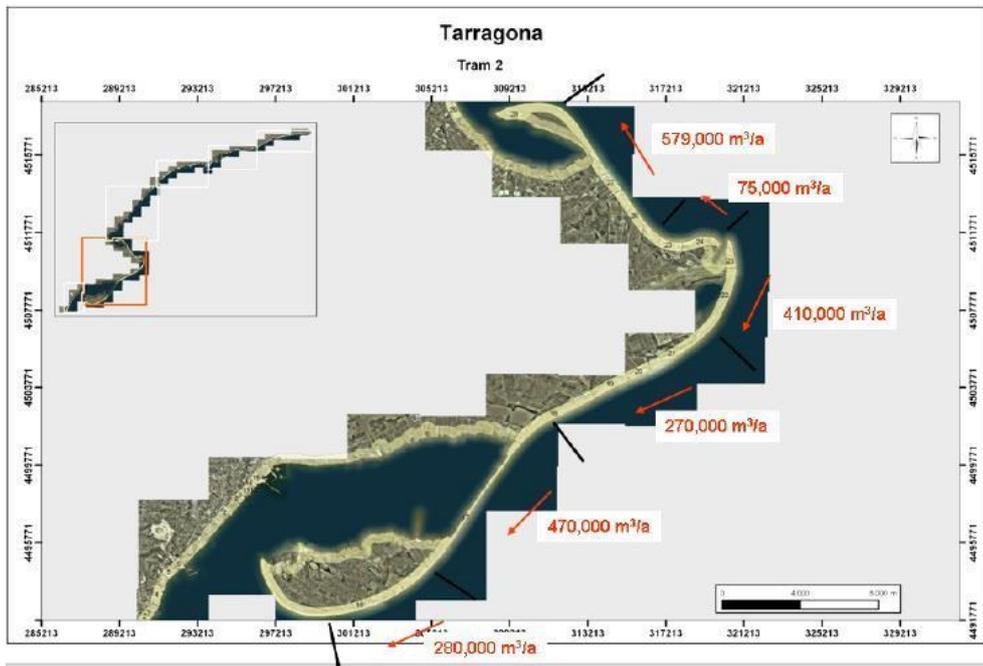


Figura 4.50: Tasas de transporte longitudinal neto ($m^3/año$) estimados con el modelo de CERC para el tramo del Delta del Ebro (Fuente: CIIRC, 2008)

De forma más detallada se han recogido los valores de las tasas de transporte longitudinal que se dan en las fichas del 'Libro Verde del Estado de la Zona Costera de Cataluña' (CIIRC, 2010) para cada zona. Se resumen dichos valores a continuación (Tabla 4.11):



Tabla 4.11: Tasas de transporte longitudinal - CERC (m ³ /año) (CIIRC, 2010)			
Playa	Neto	Bruto	Hacia Poniente
Punta de la Banya	280.639	664.970	472.804
Trabucador	470.862	858.806	664.834
Platjola	270.023	636.239	453.131
Serrallo	270.023	636.239	453.131
Migjorn	270.023	636.239	453.131
Isla de Buda	270.023	636.239	453.131
Embarcadero	-75.530	176.776	50.622
Riumar	-75.530	176.776	50.622
Bassa Arena	-579.150	640.748	30.798
Marquesa	-579.150	640.748	30.798
Fangar	-579.150	640.748	30.798

4.2.2.12 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión de la desembocadura y cauce inferior del río en el delta del Ebro (Tarragona)” (IHAC-UC, 2011)

Para el cálculo del transporte sólido litoral longitudinal, este estudio aplica la fórmula del CERC (1984) para el cálculo del transporte sólido longitudinal, indicando que no se considera la granulometría en dicha fórmula, para lo cual usan una expresión del coeficiente empírico de la fórmula de Del Valle, Medina y Losada:

$$K = 1,4e^{-2,5D_{50}}$$

Suponen un tamaño medio de sedimento $D_{50}=0.12$ mm, y calculan la capacidad de transporte longitudinal en 29 tramos de la costa. Como no dispusieron de batimetría, los autores indican que se tome estos resultados (Figura 4.51) con cautela.

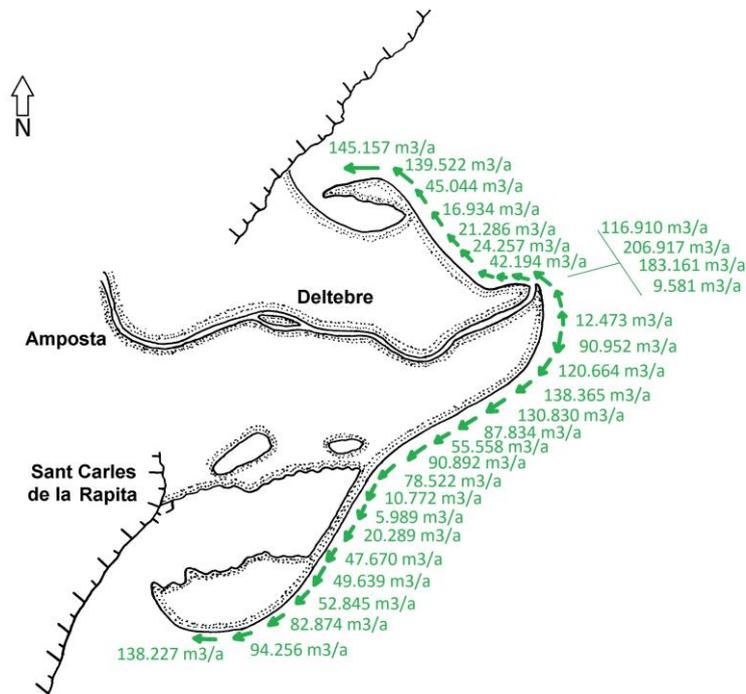


Figura 4.51: Capacidad de transporte longitudinal de sedimentos según (IHAC-UC, 2011)

Según se indica, el sedimento procedente del Cabo Tortosa se acumula en la zona del Fangar y Punta de la Banya. La distribución espacial del transporte se muestra en la Figura 4.52, donde se puede ver que el tránsito de sedimento se da en las zonas de Marquesa y Riumar en el Norte y Trabucador, Eucaliptos y Migjorn en el Sur.

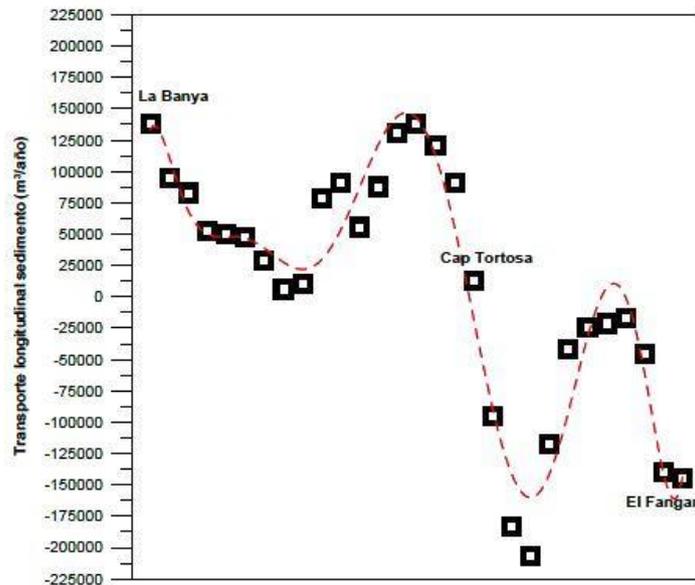


Figura 4.52: Distribución espacial de las tasas de transporte longitudinal (Fuente: IHAC-UC (2011))

4.2.2.13 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero del Delta del Ebro” (LIM, 2011)

En este estudio se calculan las tasas del transporte longitudinal neto de sedimento a medio plazo y largo plazo, en tres periodos (1957-1973, 1973-1989 y 1989-2009), a partir de las tasas de desplazamiento de la línea de orilla; asumiendo las siguientes hipótesis:

- Que el comportamiento es representativo del medio y largo plazo ya que se han filtrado los cambios a corto plazo.
- Que el transporte principalmente dominante es el transporte longitudinal
- Que el perfil de playa no cambia de forma al desplazarse.
- Se considera la zona entre la profundidad activa y la altura de berma.

Para las condiciones de contorno se considera el transporte nulo en el Cabo Tortosa, para el hemidelta Norte. En el hemidelta Sur se consideran dos condiciones: una condición de bypass de sedimento en la desembocadura hacia el hemidelta Norte y otra alternativa de interrupción del bypass con transporte nulo en el Cabo Tortosa. Además, se ha estimado la respuesta en el desplazamiento de la línea de orilla por el aumento del nivel del mar, a partir de la regla de Bruun, y se han calculado los valores de las tasas de transporte con y sin consideración de dicho efecto (con corrección). El análisis global de este estudio se ha realizado en el apartado del capítulo 2 dedicado a estudios recientes.

Los valores obtenidos a largo plazo son mayores debido a que la profundidad activa corresponde al orden décadas y no anual, como se suele calcular usualmente en otros estudios.

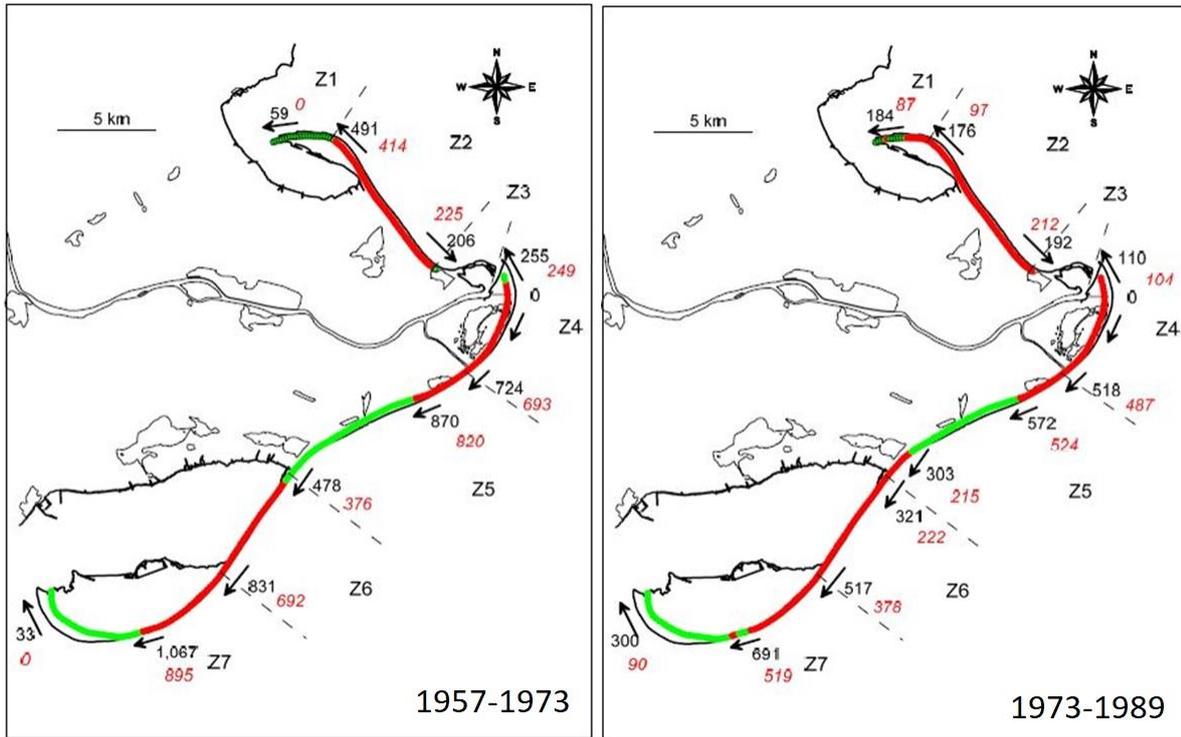


Figura 4.53: Transporte longitudinal neto ($10^3 \text{ m}^3/\text{año}$) a largo plazo en 1957-1973 y 1973-1989. (Valores rojos en cursiva eliminando subida del nivel del mar). (Fuente: UPC-LIM, 2011)

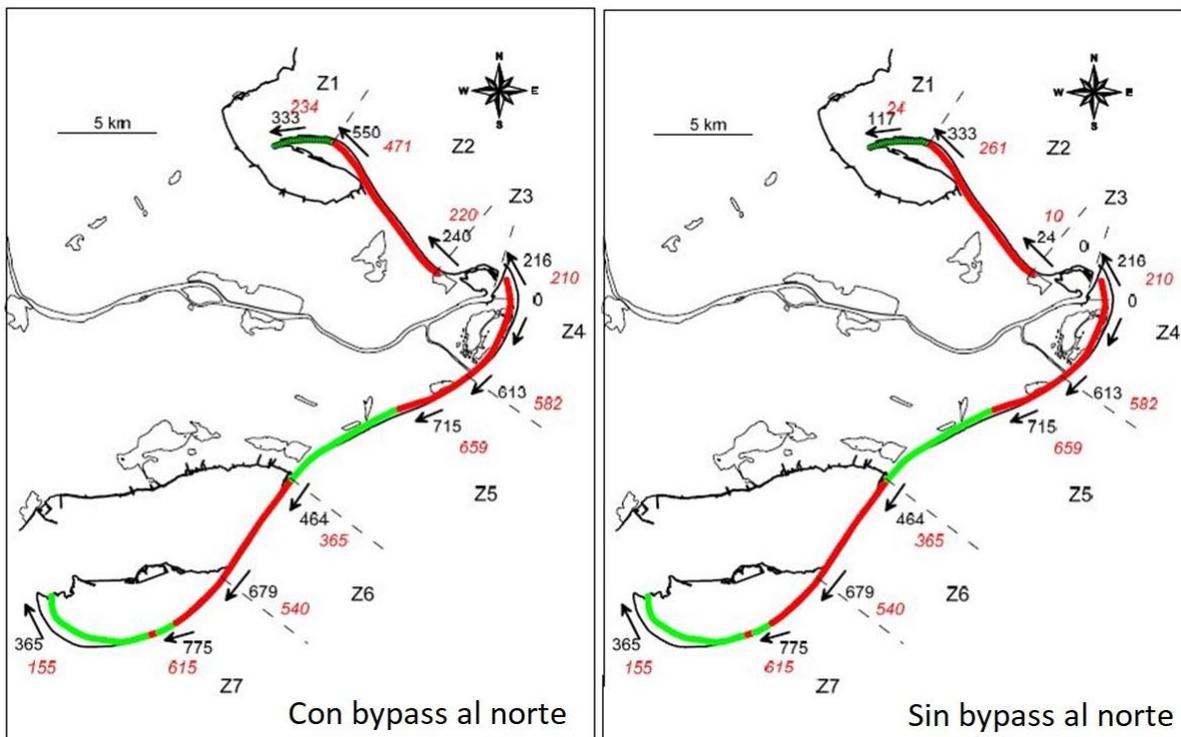


Figura 4.54: Transporte longitudinal neto ($10^3 \text{ m}^3/\text{año}$) a largo plazo en 1989-2009 con y sin bypass al Norte. (Valores rojos y cursiva sin subida del nivel del mar). Fuente: UPC-LIM, 2011.

Se observan mayores tasas de transporte para el periodo 1957-1973, y los cambios en el siguiente periodo (1973-1989) respecto al anterior llegan a reducirse en algunas zonas hasta el 50% (Figura 4.53). Para el último periodo se puede apreciar en el hemidelta Norte también la gran reducción de transporte cuando se asume que el bypass de sedimento de la desembocadura pudiera quedar bloqueado (Figura 4.54). Los autores señalan que esta condición de contorno es la que genera los resultados más realistas en cuanto a las situaciones del estudio (2011).

La caracterización a medio plazo da idea de la situación en el año del estudio (2011) y se ha calculado con la profundidad activa a medio plazo. Los resultados para ambas hipótesis reflejan el mismo comportamiento que en el largo plazo, aunque los volúmenes son menores; dada la menor variación de la línea de orilla en el medio plazo (Figura 4.55).

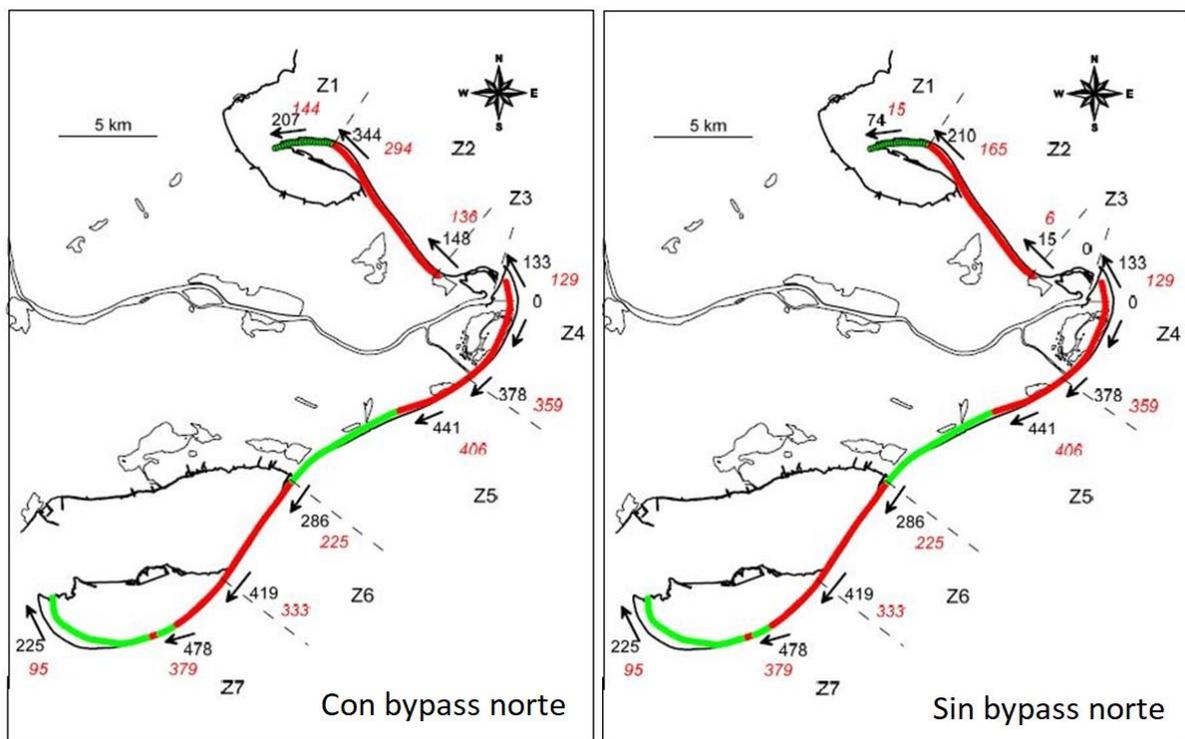


Figura 4.55: Transporte longitudinal neto ($10^3 \text{ m}^3/\text{año}$) a medio plazo en 1989-2009 con y sin bypass al Norte. (Valores rojos en cursiva sin subida del nivel del mar). Fuente: UPC-LIM, (2011).

4.2.3 Resumen del transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa del Delta del Ebro

Como se ha podido apreciar en los apartados anteriores, la caracterización del transporte de sedimentos a lo largo de las playas del Delta del Ebro está perfectamente realizada; el problema aparece cuando se analizan todos estos datos ya que, aparte de haberse determinado por dos vías distintas, con conceptos (capacidad de transporte y transporte real) diferentes, la disparidad de los datos hace que se tenga que tomar algún criterio que los englobe. Ha parecido lo más conveniente elegir los puntos más característicos de esta costa y representar el valor medio de todos los datos presentados, con indicación de los valores máximo y mínimo. El resultado se muestra en la Figura 4.56 y en la Tabla 4.12.



Figura 4.56: Resumen del transporte de sedimentos a lo largo de las playas del Delta del Ebro
(Foto: Google Earth)

Este transporte a lo largo de la costa, junto al que se produce transversalmente a ella, es el responsable de las transformaciones que se van produciendo en las playas que forman la costa del delta del Ebro. De manera general; cuando la velocidad de transporte se ralentiza la playa tiende a acumular arena o sedimento, mientras que cuando la velocidad aumenta respecto a aguas arriba la playa tiende a perder sedimento. El problema es que los valores calculados del transporte de sedimentos a lo largo de la costa tienen en cada punto una horquilla tan grande que el grado de incertidumbre que crean es muy grande. Por lo tanto no existe un claro valor del transporte a lo largo de la costa sino unas tendencias y números aproximados, más cualitativos que cuantitativos.



Tabla 4.12: Resumen del transporte de sedimentos a lo largo de las playas del Delta del Ebro (m³/año)

Zona	Media	Max.	Min.
1- Extremo Fangar	120.000	333.000	25.000
2- Fangar	142.000	550.000	45.000
3- Playa Marquesa	57.000	125.000	17.000
4- Riumar	52.000	240.000	-206.000
5- Desembocadura	117.000	255.000	30.000
6- Cabo Tortosa	8.500	104.000	-90.952
7- Isla de Buda	-237.600	-724.000	-105.000
8- Eucaliptus	-198.000	-870.000	-55.000
9- Trabucador norte	-139.600	-480.000	-11.000
10- Trabucador	-180.000	-470.000	-5.989
11- Trabucador trans.	23.000	30.000	16.000
12- La Banya	-210.000	-692.000	-48.000
13- La Banya Sur	-295.000	-895.000	-82.874
14- La Banya final	-154.000	-595.000	0

4.3 BALANCE SEDIMENTARIO

El concepto de balance sedimentario fue introducido por Bowen e Inman en 1966 (“budget of sediments”) como metodología de aplicación a los estudios de la costa sur de California



(Komar 1996) para comprender mejor cómo se movía y qué cantidad de sedimento permanecía o se perdía de una unidad costera. Por tanto, como indica Komar (1996), el estudio sedimentario de un tramo de costa es conveniente extenderlo a toda la unidad fisiográfica o sistema litoral, aunque en muchas ocasiones la unidad fisiográfica resulta demasiado extensa, teniéndose que limitar a estudiar el balance sedimentario a la sub unidad o a un tramo de costa dado.

Siguiendo la clasificación clásica de Bowen e Inman (1966), se separan los componentes que hacen aumentar y perder sedimento, y su balance, como muestra la tabla 1.

Tabla 4.13: Balance sedimentario (Bowen e Inman 1966)		
Aumento	Pérdidas	Balance
<ul style="list-style-type: none">• Transporte longitudinal entrante• Aporte fluvial• Transporte transversal hacia tierra• Erosión de acantilados• Depósitos biogénicos• Depósitos hidrogénicos• Transporte eólico hacia el mar• Alimentación artificial	<ul style="list-style-type: none">• Transporte longitudinal saliente• Transporte transversal hacia el mar• Transporte eólico hacia tierra• Disolución y abrasión• Extracción• Cañones submarinos	<ul style="list-style-type: none">• Playa en erosión• Playa en aumento

El objetivo final de la realización balance de sedimentos es:

- Conocer la cantidad de arena que aumenta o disminuye en cada tramo de costa del sistema litoral.
- Saber la cantidad de arena que se pierde hacia los sumideros del sistema litoral.
- Saber la cantidad de arena que se introduce en el sistema litoral.
- Conocer cómo se va redistribuyendo la arena que se mueve en el sistema litoral.

Existen dos formas de abordar este recuento o balance de sedimentos en el sistema litoral que forma el Delta del Ebro:

- a. Separar en subtramos con comportamientos y estructuras físicas parecidas.
- b. Tomar globalmente todo el sistema (apartado 4.3.1).

La primera de las maneras es el que utilizan los estudios del LIM (2000, 2011 y 2012), Guillén (1992) y GENCAT (1991 y 2008). En todos ellos, se divide el Delta en dos grandes subtramos: hemidelta norte y hemidelta sur. Y dentro de cada uno de ellos, se divide a su vez por zonas de comportamiento que suelen coincidir con tramos con similares direcciones de la costa. La zonificación utilizada por estos trabajos se muestra en la Figura 4.57; en ella los datos también vienen referidos a 38 perfiles. El método de trabajo, en todos los casos, salvo en Guillén (1992), es determinar la pérdidas de volúmenes en cada zona; determinando la superficie que varía entre dos líneas de costa de años diferentes y multiplicándola por la profundidad de cierre (medio plazo -5.4 m, y largo plazo -9,5 m).

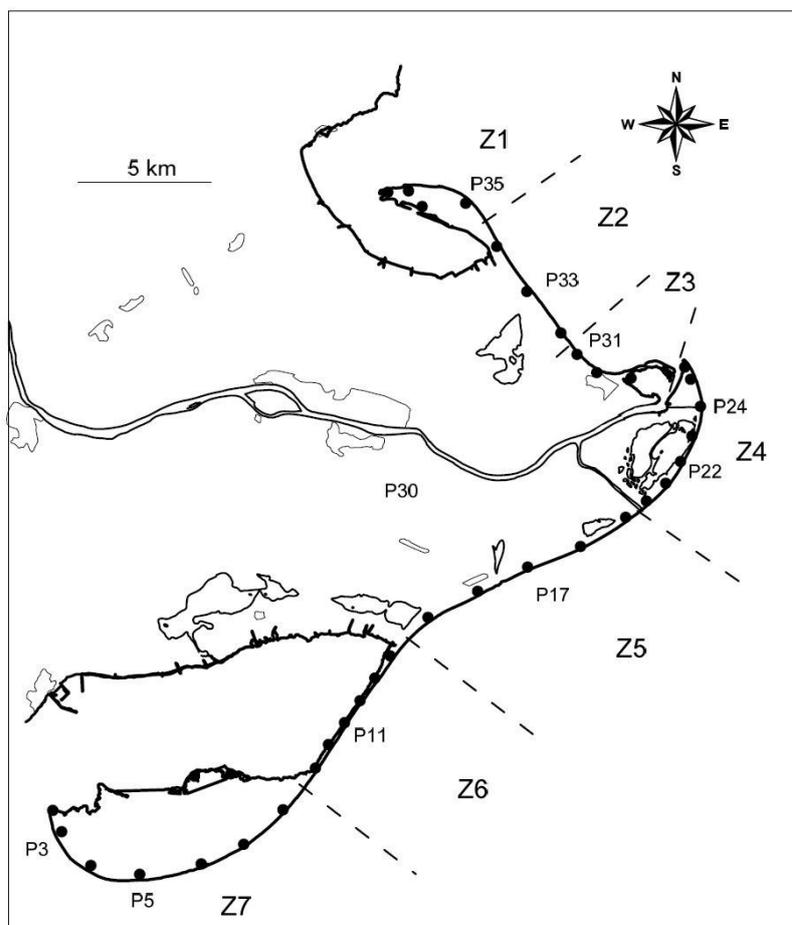


Figura 4.57: Zonificación del Delta del Ebro y localización de los perfiles a lo largo de su costa
(Fuente: LIM, 2011)

Esta zonificación está compuesta por las siguientes zonas y perfiles:

Hemidelta norte:

- Z1 (Fangar), perfiles P38 a P35
- Z2 (Playa Marquesa), perfiles P34 a P32
- Z3 (Riumar-desembocadura), perfiles P31 a P27

Hemidelta sur:

- Z4 (Cabo Tortosa-Illa Buda), perfiles P26 a P20
- Z5 (Eucaliptus), perfiles P19 a P15
- Z6 (Trabucador), perfiles P14 a P9
- Z7 (La Banya), perfiles P8 a P1

La segunda de las maneras, tomar globalmente todo el sistema litoral del Delta, es la que se utiliza para la determinación del balance sedimentario en este informe.



CEDEX

4.3.1 Estudios con balance sedimentario

Todos los estudios que se han analizado, incluido en “Estudios recientes” en el capítulo 2, utilizan la zonificación realizada por el LIM; siendo éstos:

1. “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario a partir de tendencias evolutivas de la línea de orilla” (Jiménez y García-GENCAT, 1991).
2. “Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del Delta del Ebro” (Guillén, 1992)
3. “Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain” (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993)
4. “Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro” (LIM-UB, 2000)
5. “Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña. Número 1: el Delta del Ebro. Documento de síntesis” (GENCAT, 2008)
6. “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero del Delta del Ebro” (LIM, 2011)

4.3.1.1 “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro. Balance sedimentario a partir de tendencias evolutivas de la línea de orilla” (Jiménez y García-GENCAT, 1991)

Las Figuras 4.36 y 4.37 muestran el análisis del balance sedimentario que se realiza en este estudio, que adaptado a la zonificación del LIM (2000) de la Figura 4.57, daría los siguientes resultados:

Hemidelta norte:

- Z1 (Fangar, P37 a P35)= -10.000 -37.000 = -47.000 m³/año
- Z2 (P. Marquesa, P34 a P32)= -4.000 -14.000 -50.000= -68.000 m³/año
- Z3 (Riumar-desembocadura, P31 a P27)= -8.000 m³/año

Total hemidelta norte= -123.000 m³/año

Hemidelta sur:

- Z4 (Cabo Tortosa- Buda, P26 a P20)= -126.000 -105.000 +21.000= -210.000 m³/año
- Z5 (Eucaliptus, P19 a P15)= -26.000 +99.000= +73.000 m³/año
- Z6 (Trabucador, P14 a P9)= -125.000 m³/año
- Z7 (La Banya, P8 a P2)= -46.000 +21.000= -25.000 m³/año

Total hemidelta sur= -287.000 m³/año

BALANCE TOTAL: -410.000 m³/año



4.3.1.2 "Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del Delta del Ebro" (Guillén, 1992)

Toma los mismos perfiles que el resto de los trabajos (Figura 4.39); pero usa la variación volumétrica obtenida mediante campañas de campo durante un año (de marzo de 1990 a marzo de 1991). La variación de volumen encontrada se muestra en la tabla de la Figura 4.58

PERFILES	INCREMENTO DE VOLUMEN
3-4	+782.600
5-8	-1.285.200
9	+220.400
10-14	-242.200
15-20	+395.300
21-23	-354.300
24-26	-667.500
30-33	-91.550
34-35	-417.200
36	+93.600
TOTAL	-1.566.050

Figura 4.58: Variación volumétrica entre marzo de 1990 u marzo de 1991, los perfiles (Figura 4.39) son los tomados también por el LIM (Fuente Guillén, 1992)

Que daría los siguientes resultados:

Hemidelta norte:

- Z1 (Fangar, P36)= +93.000 m³/año
- Z2 (P. Marquesa, P35 a P30)= -508.000 m³/año
- Z3 (Riumar-desembocadura, P30 a P27)= no hay datos

Total hemidelta norte= -415.000 m³/año

Hemidelta sur:

- Z4 (Cabo Tortosa- Buda, P26 a P21)= -677.500 -350.300 +21.000= -1.021.800 m³/año
- Z5 (Eucaliptus, P20 a P15)= +354.300 m³/año
- Z6 (Trabucador, P14 a P9)= -242.200 +220.400= -21.800 m³/año
- Z7 (La Banya, P8 a P3)= -1.285.200 +782.600= -502.600 m³/año

Total hemidelta sur= -1.191.900 m³/año

BALANCE TOTAL: -1.566.050 m³/año

4.3.1.3 "Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain" (Jiménez y Sánchez-Arcilla, 1993)

Las Figuras 4.43 y 4.44 muestran el análisis del balance sedimentario que se realiza en este estudio, que adaptado a la zonificación del LIM (2000) de la Figura 4.57, daría los siguientes resultados:



CEDEX

Hemidelta norte:

- Z1 (Fangar, P37 a P35)= +37.000 +33.000 (o 63.000)= +70.000 a +100.000 m³/año
- Z2 (P. Marquesa, P34 a P32)= -70.000 m³/año
- Z3 (Riumar-desembocadura, P31 a P27)
- Aportes río: 0 a +30.000 m³/año

Total hemidelta norte= 0 a -30.000 m³/año

Hemidelta sur:

- Z4 (Cabo Tortosa- Buda, P26 a P20)=+104.000 -241.000 = -137.000 m³/año
- Z5 (Eucaliptus, P19 a P15)= -16.000 +103.000= +87.000 m³/año
- Z6 (Trabucador, P14 a P9)= -118.000 m³/año
- Z7 (La Banya, P8 a P2)= -78.000 +230.000= 152.000 m³/año
- Sumidero Alfaques a través del Trabucador= -16.000 m³/año

Total hemidelta sur= 0 m³/año**BALANCE TOTAL: 0 a -30.000 m³/año**

4.3.1.4 “Caracterización de la problemática y alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro” (LIM-UB, 2000)

Este informe presenta el mismo balance sedimentario que el trabajo anterior, de 1993, aunque se ordena de manera algo más clara e introduce las distancias y superficies donde se supone que se mueve el sedimento. Por ello se reproduce igualmente, aunque sea repetitivo.

Hemidelta norte:

- Sumidero Fangar: 63.000 m³/año
- Z1 (Fangar, P37 a P35)= +37.000 m³/año
- Z2 (P. Marquesa, P34 a P32)= -70.000 m³/año
- Z3 (Riumar-desembocadura, P31 a P27)= +30.000 m³/año (Aportes río)

Total hemidelta norte= 0 m³/año

Hemidelta sur:

- Z4 (Cabo Tortosa- Buda, P26 a P20)=+104.000 -241.000 = -137.000 m³/año
- Z5 (Eucaliptus, P19 a P15)= -16.000 +103.000= +87.000 m³/año
- Z6 (Trabucador, P14 a P9)= -118.000 m³/año
- Z7 (La Banya, P8 a P2)= -78.000 +230.000= 152.000 m³/año
- Sumidero Alfaques a través del Trabucador= -16.000 m³/año

Total hemidelta sur= 0 m³/año**BALANCE TOTAL: 0 m³/año**



4.3.1.5 “Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña. Número 1: el Delta del Ebro. Documento de síntesis” (GENCAT, 2008)

Hemidelta norte:

Total hemidelta norte= -8.000 m³/año

Hemidelta sur:

- Z4 (Cabo Tortosa- Buda, P26 a P20)= -236.600 m³/año
- Z5 (Eucaliptus, P19 a P15)= +56.500 +33.500= +90.000 m³/año
- Z6 (Trabucador, P14 a P9)= -4.000 m³/año
- Z7 (La Banya, P8 a P2)= -89.400 +138.000= +48.600 m³/año

Total hemidelta sur= -102.000 m³/año

BALANCE TOTAL: -110.000 m³/año

El balance parece incompleto; pero si se interpreta que esos 110.000 m³/año como la cantidad que entra en la Z1 y bahía del Fangar, que parece que se ha omitido, quizás por error, entonces el balance cuadraría.

4.3.1.6 “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero del Delta del Ebro” (LIM, 2011)

La novedad que presenta este estudio es que el balance sedimentario se realiza por periodos de tiempo como se muestra en las Figuras 2.57 a 2.60 y los resultados se muestran en una tabla, Figura 2.56. Para uniformizar los resultados, se muestra a continuación los resultados que en informe dice como actual que sería el balance sedimentario que entonces se daría a medio plazo, última columna de la tabla indicada y que corresponde con la Figura 2.60, que se reproduce a continuación:

Hemidelta norte:

- Z1 (Fangar, P37 a P35)= +136.600 m³/año
- Z2 (P. Marquesa, P34 a P32)= -195.300 m³/año
- Z3 (Riumar-desembocadura, P31 a P27)= -15.000 m³/año

Total hemidelta norte= -73.700 m³/año

Hemidelta sur:

- Z4 (Cabo Tortosa- Buda, P26 a P20)= -511.800 m³/año
- Z5 (Eucaliptus, P19 a P15)= +92.200 m³/año
- Z6 (Trabucador, P14 a P9)= -132.700 m³/año
- Z7 (La Banya, P8 a P2)= -78.000 +230.000= +193.500 m³/año

Total hemidelta sur= -358.800 m³/año

BALANCE TOTAL: -432.500 m³/año

Existen algunas pequeñas diferencias entre los datos de la tabla (Figura 2.56) y los que se presentan en la Figura 2.60, que son los que se han utilizado en este balance. En ambos casos indicaría que se depositarían los 73.700 m³/año en la bahía del Fangar y de L’Ampolla;



mientras que los 358.800 m³/año lo harían en la bahía de los Alfaques y en el canal dragado de aproximación al puerto de Sant Carles de la Rápita. Ambos datos son compatibles con el poder absorbente de estos dos sumideros como se ha indicado en el apartado 4.1.3 de este capítulo.

4.3.2 Balance sedimentario global del sistema litoral del Delta

Otra manera de abordar el balance sedimentario del sistema litoral del Delta del Ebro es considerar este como una unidad y analizar en ella las pérdidas y ganancias interiores globalmente, a lo que habría que añadir las fuentes exteriores de sedimentos y los sumideros de éstos. En ambos casos (fuentes y sumideros) existen muchas incertidumbres, tal como se ha descrito en el apartado 4.1 de este capítulo. Por ello, con respecto al elemento emisor (fuente) se ha optado por tomar un valor de referencia de 30.000 m³/año dado por el LIM; con respecto a los sumideros, se considerará una horquilla de valores tanto la bahía del Fangar y L'Ampolla como la bahía de los Alfaques para comparar si los resultados obtenidos en el balance entran dentro de este encuadre.

Para analizar las pérdidas y ganancias de volumen dentro del sistema, se ha optado por comparar diversas ortoimágenes con la del PNOA de 2018 (Instituto Geográfico Nacional). Las superficies que se han considerado son aquellas expuestas al oleaje. La observación de la línea de costa en el interior de las bahías de los Alfaques y Fangar es complicada dado que es más o menos transparente la lámina del agua según la ortoimagen, y se obtiene más o menos detalle de las aguas someras; dando lugar a equívocos y errores. La transformación de la diferencia de superficies a volumen se ha realizado utilizando las profundidades de cierre que ha calculado el LIM (2011):

- PdC (medio plazo): 5,4 m
- PdC (largo plazo): 9,5 m

Las ortoimágenes usadas corresponden a los años siguientes: 1957, 1983, 1994, 2004, 2015 y 2018.

En las Figuras 4.59 a 4.63 se muestra la comparación de las ortoimágenes con la base de 2018 y el resultado con la superficie perdida, ganada y la diferencia entre las dos en hectáreas (ha). A ellas habría que multiplicarle por la profundidad de cierre que en todos los casos, salvo en 2015, se ha tomado de 9,5 m ya que la comparación es más de una década, mientras en la comparación de 2015 se ha tomado 5,4 m como profundidad de cierre.

Con respecto a los balances, se ha considerado que la salida de material desde la costa exterior es igual a la suma de fuentes (30.000 m³/año) y las pérdidas calculadas por diferencia de superficie frente de costa exterior erosionado) debe ser igual a la cantidad absorbida por los sumideros.

4.3.2.1 Balance sedimentario (1957-2018)

El número de años es 61 y la diferencia de superficie entre ambos estados se muestra en la Figura 4.59.

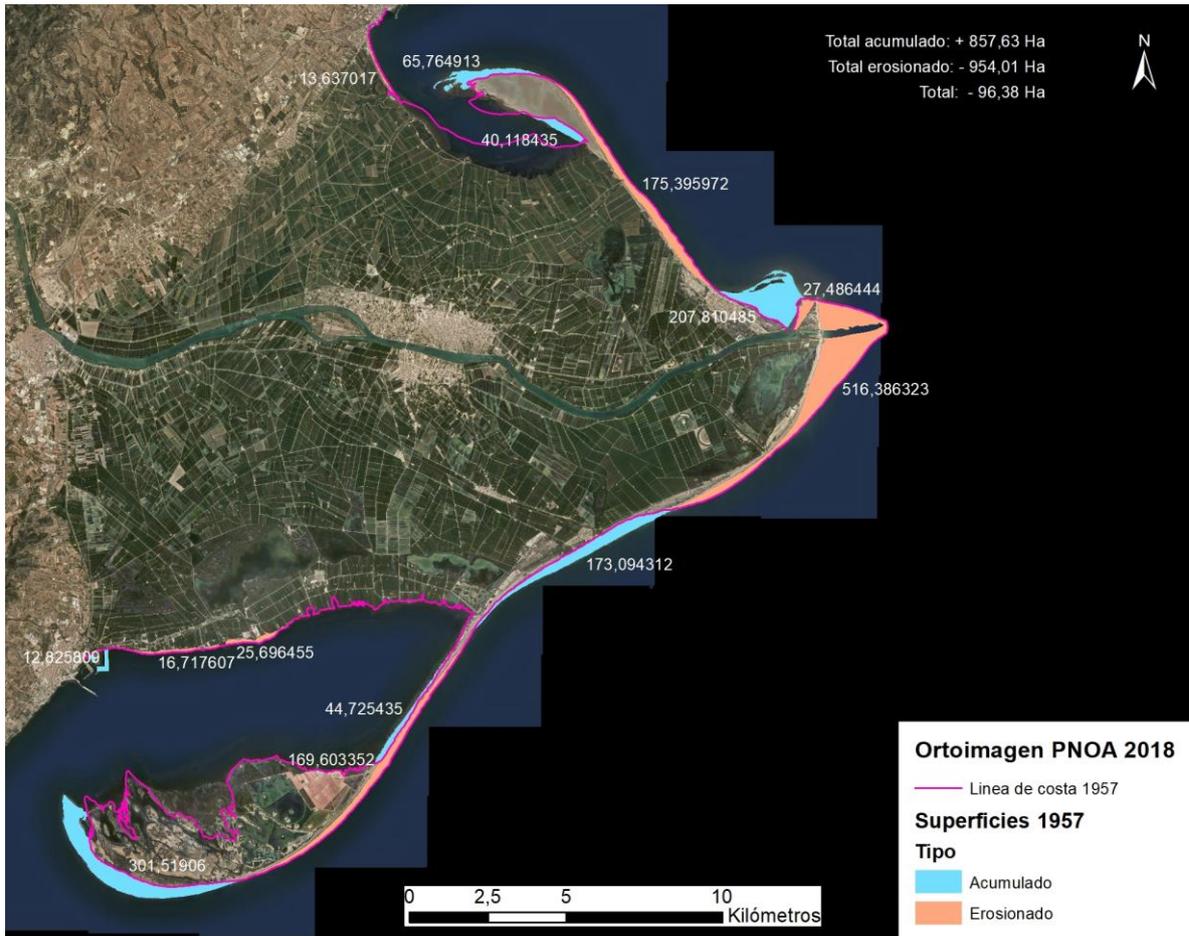


Figura 4.59: Variación de superficie de la costa del Delta del Ebro entre 1957 y 2018 (Ortoimagen: IGN)

- Balance interior del sistema: $-9.156.100 \text{ m}^3 \rightarrow -150.100 \text{ m}^3/\text{año}$
- Fuente: $30.000 \text{ m}^3/\text{año}$
- Sumidero: $122.000 \text{ m}^3/\text{año}$ (año benigno) a $366.000 \text{ m}^3/\text{año}$ (año con oleaje)
 - Fangar + Ampolla= 30.000 a $92.000 \text{ m}^3/\text{año}$
 - Alfaques= 92.000 a $276.000 \text{ m}^3/\text{año}$

BALANCE TOTAL₁₉₅₇₋₂₀₁₈ (pérdidas +fuente=sumidero): $-150.100 -30.000 +180.100^* = 0$

(*) Valor considerado para cuadrar el balance, dentro de la horquilla de valores del sumidero.

4.3.2.2 Balance sedimentario (1983-2018)

El número de años es 35 y la diferencia de superficie entre ambos estados se muestra en la Figura 4.60.



Figura 4.60: Variación de superficie de la costa del Delta del Ebro entre 1983 y 2018 (Ortoimagen: IGN)

- Balance interior del sistema: $-5.207.900 \text{ m}^3 \rightarrow -148.797 \approx -150.000 \text{ m}^3/\text{año}$
- Fuente: $30.000 \text{ m}^3/\text{año}$
- Sumidero: $122.000 \text{ m}^3/\text{año}$ (año benigno) a $366.000 \text{ m}^3/\text{año}$ (año con oleaje)
 - Fangar + Ampolla= 30.000 a $92.000 \text{ m}^3/\text{año}$
 - Alfaques= 92.000 a $276.000 \text{ m}^3/\text{año}$

BALANCE TOTAL₁₉₈₃₋₂₀₁₈: $-150.000 -30.000 +180.000^* = 0$

(*) Valor considerado para cuadrar el balance, dentro de la horquilla de valores del sumidero.

4.3.2.3 Balance sedimentario (1994-2018)

El número de años es 24 y la diferencia de superficie entre ambos estados se muestra en la Figura 4.61.



Figura 4.61: Variación de superficie de la costa del Delta del Ebro entre 1994 y 2018 (Ortoimagen: IGN)

- Balance interior del sistema: $-9.937.000 \text{ m}^3 \rightarrow -397.480 \text{ m}^3/\text{año}$
- Fuente: $30.000 \text{ m}^3/\text{año}$
- Sumidero: $122.000 \text{ m}^3/\text{año}$ (año benigno) a $366.000 \text{ m}^3/\text{año}$ (año con oleaje)
 - Fangar + Ampolla= 30.000 a $92.000 \text{ m}^3/\text{año}$
 - Alfaques= 92.000 a $276.000 \text{ m}^3/\text{año}$

BALANCE TOTAL₁₉₉₄₋₂₀₁₈: $-397.480 - 30.000 + 366.000 = -61.480 \text{ m}^3/\text{año}$

(*) Se ha tomado este dato para cuadrar ya que está próximo al extremo de la horquilla adjudicada al sumidero y excede de la capacidad estimada del sumidero de $366.000 \text{ m}^3/\text{año}$.

4.3.2.4 Balance sedimentario (2004-2018)

El número de años es 14 y la diferencia de superficie entre ambos estados se muestra en la Figura 4.62.

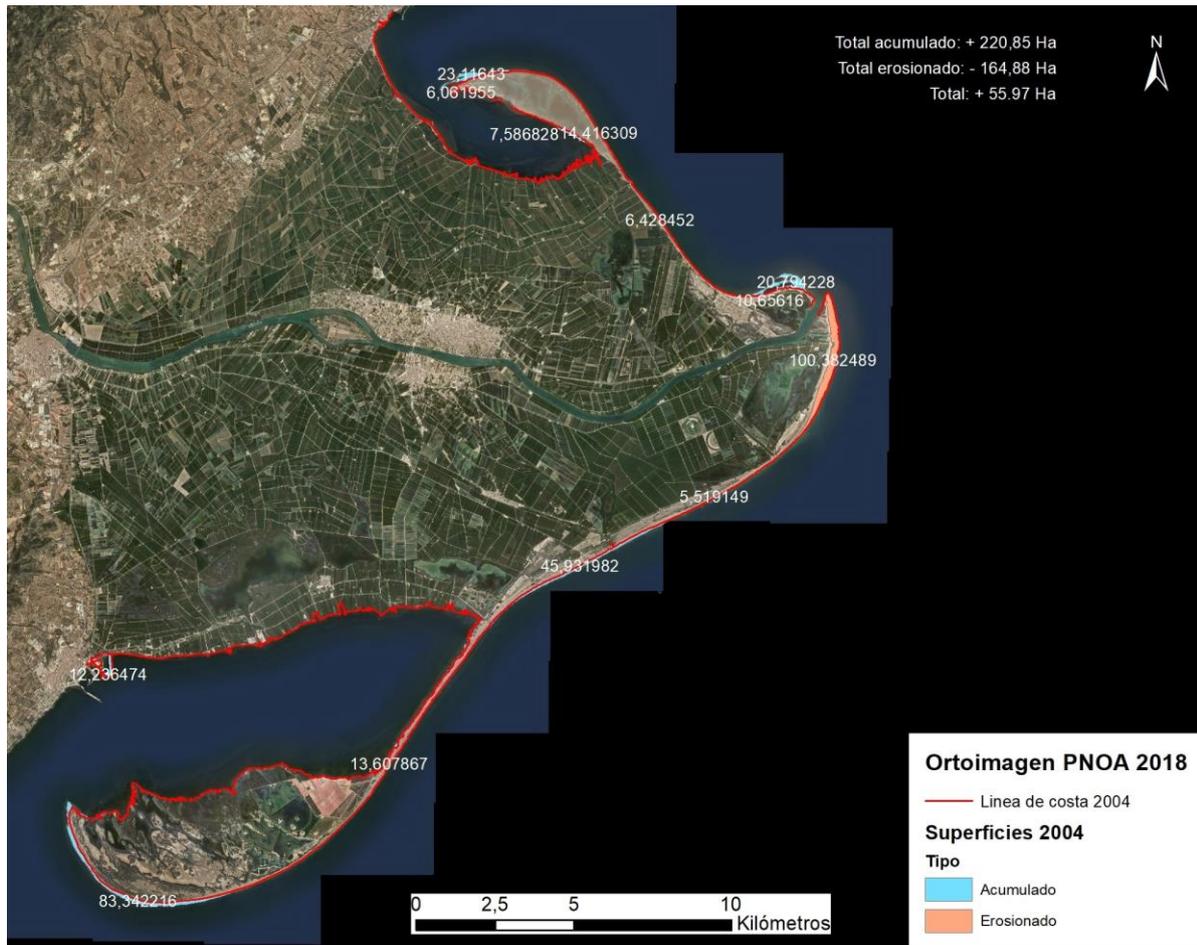


Figura 4.62: Variación de superficie de la costa del Delta del Ebro entre 2004 y 2018 (Ortoimagen: IGN)

- Balance interior del sistema: $-5.317.150 \text{ m}^3 \rightarrow -379.796 \text{ m}^3/\text{año}$
- Fuente: $30.000 \text{ m}^3/\text{año}$
- Sumidero: $122.000 \text{ m}^3/\text{año}$ (año benigno) a $366.000 \text{ m}^3/\text{año}$ (año con oleaje)
 - Fangar + Ampolla= 30.000 a $92.000 \text{ m}^3/\text{año}$
 - Alfaques= 92.000 a $276.000 \text{ m}^3/\text{año}$

BALANCE TOTAL₂₀₀₄₋₂₀₁₈: $-379.796 - 30.000 + 366.000 = -43.796 \text{ m}^3/\text{año}$

4.3.2.5 Balance sedimentario (2015-2018)

El número de años es 3, por lo que se ha tomado una profundidad de cierre de 5,4 m. La diferencia de superficie entre ambos estados se muestra en la Figura 4.63.



Figura 4.63: Variación de superficie de la costa del Delta del Ebro entre 2015 y 2018 (Ortoimagen: IGN)

- Balance interior del sistema: $-1.467.180 \text{ m}^3 \rightarrow -489.060 \text{ m}^3/\text{año}$
- Fuente: $30.000 \text{ m}^3/\text{año}$
- Sumidero: $122.000 \text{ m}^3/\text{año}$ (año benigno) a $366.000 \text{ m}^3/\text{año}$ (año con oleaje)
 - Fangar + Ampolla= 30.000 a $92.000 \text{ m}^3/\text{año}$
 - Alfaques= 92.000 a $276.000 \text{ m}^3/\text{año}$

BALANCE TOTAL₂₀₁₅₋₂₀₁₈: $-489.060 -30.000 +366.000= -153.060 \text{ m}^3/\text{año}$

Este es periodo, al igual que 1994-2018 y 2004-2018, no cuadra con la horquilla de sumidero y el volumen de sedimento aportado por la fuente. Ello puede ser debido a diferentes causas como a que el sumidero tenga mayor capacidad de absorción en ambos sentidos (Fangar-Ampolla y Alfaques) a la supuesta. También en este periodo puede haber habido un movimiento transversal diferente. Si el excedente se repartiese de manera similar al poder del sumidero supuesto, entonces para cuadrar el balance el sumidero norte (Fangar-Ampolla) tendría que haber incrementado en $23.393 \text{ m}^3/\text{año}$, y el sur (Alfaques) en $70.177 \text{ m}^3/\text{año}$, que supondría un 25,5% más.



4.3.3 Resumen de los balances sedimentarios

Finalmente, para poder realizar un análisis correcto de este balance sedimentario, calculado por los dos métodos indicados, que son complementarios, se ha generado dos tablas: En la primera de ellas se resume los resultados del balance sedimentario de los seis trabajos considerados y del realizado expresamente para este Plan: en la segunda de ellas se resume el balance sedimentario calculado en este trabajo por periodos; que ayudará a entender la variación que se produce de él a lo largo del tiempo.

Estudio	Hemidelta norte	Hemidelta sur	Fuente	Sumidero		TOTAL
				Fangar	Alfaques	
GENCAT (1991)	-123.000	-287.000				-410.000
Guillen (1992)	-415.000	-1.191.900				-1.566.050
Jiménez y Sánchez-Arcilla (1993)	0/-30.000	0	0/30.000		16.000	-16.000/-46.000
LIM-UB (2000)	0	0		63.000	16.000	-79.000
GENCAT (2008)	-8.000	-102.000				-110.000
LIM (2011)	-73.000	-358.000				-432.500
CEDEX (2020)			30.000	30.000	150.000	-150.000

Tabla 4.15: Resumen del Balance sedimentario del CEDEX (2020) por periodos (m ³ /año)			
Periodo	TOTAL	Fuente	Sumidero (Exceso)
1957-2018	-150.100	30.000	180.100
1984-2018	-150.000	30.000	180.000
1994-2018	-397.480	30.000	366.000 (61.480)
2004-2018	-379.796	30.000	366.000 (43.796)
2015-2018	-489.060	30.000	366.000 (153.000)

De estas tablas se puede extraer que los balances sedimentarios de GENCAT (1991), LIM (2011) y CEDEX (2020), en el último periodo, son similares. Los datos obtenidos en la tesis de Guillén (1992) son excesivos; pudiendo corresponder a un estado momentáneo evolutivo por lo que podría representar picos en él.

La tabla 4.15 muestra una variación al alza de las pérdidas de sedimento a lo largo del tiempo; con un máximo en el periodo 2015-18, que corresponden con los valores dados por el LIM (2011)

De ambas tablas se desprende que existe un déficit de sedimentos en la costa del Delta que se situaría en una horquilla entre 180.000 y 519.000 m³/año; con una distribución que tendría una relación Hemidelta norte/Hemidelta sur de: $92/276 = 1/3$. Por lo que la horquilla de pérdidas se situaría:

-45.000 a 130.000 m³/año (hemidelta norte)

-135.000 a 389.000 m³/año (hemidelta sur)

4.3.4 Distorsiones en el balance sedimentario y en el transporte longitudinal de sedimentos

Los datos que se han mostrado en este capítulo, tanto en el transporte de sedimentos como en el balance sedimentario, presentan diversas dudas y distorsiones que deben aclararse.

4.3.4.1 Capacidad de los sumideros (bahías del Fangar-Ampolla y los Alfaques)

No se ha encontrado ningún trabajo que haya abordado la velocidad de sedimentación que experimentan las dos bahías (Alfaques y Fangar) y la bahía de L'Ampolla así como las lagunas. Ello hace que el balance sedimentario no pueda ser real, ni con la exactitud que se requeriría.

Por ello, sería conveniente hacer una campaña de tanto de toma de datos como de búsqueda de batimetrías históricas que precisen la velocidad de llenado y el material que lo compone, su distribución, etc., que ayuden a determinar la cantidad de sedimento, fango y arena, que se deposita anualmente y dónde se va produciendo.

Los ciclos, en determinados puntos del Delta como en el Fangar (Figura 4.64), barra del Trabucador e Illa de Buda, hacen que no solamente el mecanismo de transporte longitudinal sea el responsable de la dinámica litoral; sino también los rebases y rebañado de sedimento que hace cruzar la arena desde zonas de berma y duna hacia el interior de la bahías, además del transporte eólico que también alimenta este proceso.



Figura 4.64: Península del Fangar rebasada por el oleaje el 5 de diciembre de 2005 (Foto cortesía de Inmaculada Rodríguez Santalla)

Tampoco se ha estudiado el efecto que pudiera tener el canal de entrada del Puerto de Sant Carles de la Rápita o de puerto cargadero de Alcanar (Figura 4.65), ni se tienen datos de si se draga en ellos.

4.3.4.2 Análisis de presiones de la zona sur del Delta

Deberían estudiarse los efectos que producen las presiones portuarias en la zona sur del Delta del Ebro, bahía de los Alfaque y cuantificar las pérdidas de sedimento. Si se observa la carta náutica del Instituto Hidrográfico de la Marina de 2019 (Figura 4.65) se aprecia, al menos tres posibles presiones importantes no cuantificadas: La primera de ellas corresponde al canal de acceso al cargadero de cemento de Alcanar que mantiene una cota de -12 m; la segunda son las zonas de fondeadero sur de la península de la Banya; y la tercera es el acceso al puerto de Sant Carles de la Rápita, conectada, al menos, con uno de las zonas de fondeo.

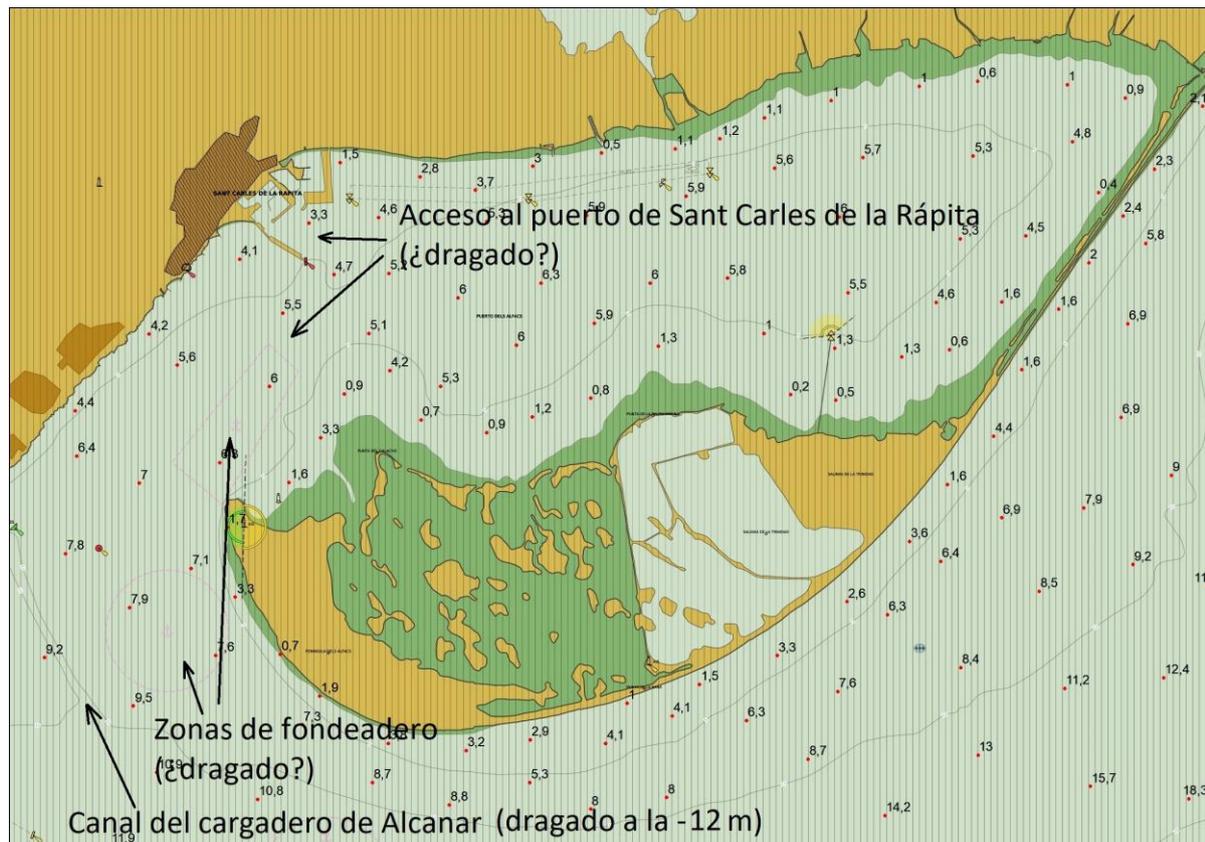


Figura 4.65: Presiones portuarias sobre el lóbulo sur del Delta del Ebro (Carta náutica del IHM)

El canal de acceso del cargadero de Alcanar mantiene una cota de -12 m con una zanja en zonas de calados menores de 8 m; esto es un gradiente de más de 4 m cuyos efectos, volumen de dragado, tipo de material, etc. no está cuantificado en los informes que contienen el balance sedimentario.

En la carta náutica citada (Figura 4.65) se detecta, al menos, dos zonas de fondeo: la primera tiene profundidades entre 7,5 y 8 m; y la segunda casi constante de 6 m, que conecta con la entrada al puerto de Sant Carles de la Rápita. Si se observa estas zonas en la carta náutica de 1974 (485 A), en ambas zonas entonces tenían calados que eran un metro menores, aproximadamente; lo que está indicando que estas profundidades son artificiales, e igualmente no se conoce el volumen y número de dragados que se han hecho. Ni se tiene

en cuenta en los estudios sobre balance sedimentario del Delta del Ebro, cuando son un potencial gradiente del sumidero de los Alfaques.

A modo de ejemplo, se tiene constancia de un dragado de mantenimiento realizado en Sant Carles de la Rápita realizado en el año 2015; concretamente entre el 11 de marzo y el 6 de julio. Se dragaron 54.639,43 m³ de material; se utilizó una draga de succión en marcha; la superficie dragada fue de 32.000 m² con un espesor medio de 1,54 m. El material era fundamentalmente arena, el 87,4%, con un 11,8% de finos. Se clasificó el material como de Categoría I y se vertió al mar a 3.100 m de distancia y 13 m. de profundidad. El dragado en peso seco fue de 91.641 t (dato reportado a los Convenios de Londres y Barcelona).

4.3.4.3 Rotura de barras

Las barras del Trabucador e Illa de Buda se han roto un número de veces muy significativo, como se ha ido indicando en este informe técnico, que ha dado lugar a informes específicos, artículos, proyectos y actuaciones de recuperación; la última hace solamente algún mes, Figura 4.66.



Figura 4.66: Rotura de la barra del Trabucador el 18 de marzo de 2020 cuando se estaba regenerando de la rotura sufrida en enero de ese mismo año (Foto: MITERD)

El efecto de las roturas de las barras es doble: por una parte erosiona un tramo importante de costa; y por otra parte, detrae sedimento del sistema llevándolo directamente al sumidero (bahía de los Alfaques o laguna de Buda) sin que la naturaleza sea capaz de revertirlo al ciclo dinámico de la costa.

El análisis de este efecto es complejo; pero el colapso especialmente del Trabucador estaría asociado a la falta de material que llega a sus costas porque la fuente, principalmente el Cabo Tortosa, parece que pudiera haber llegado a un estado de relativo límite. A ello se une el estado actual de la desembocadura que forma un “tapón” con la isla de San Antonio, que se erosiona cada vez menos. Además, el sedimento proveniente del río no es capaz de alcanzar el hemidelta sur, como se ha indicado en el apartado 4.1. Esta circunstancia hizo que la regeneración y formación de dunas con defensas eólicas hecha de la barra en 1992 (apartado 1.3.5, Figuras 1.13 a 1.5), estuviesen cuatro años más tarde, en 1996, totalmente destruidas (Figura 4.67).



Figura 4.67: Destrucción de dunas y defensas eólicas en febrero 1996, realizadas en 1992, en la barra del Trabucador (Fuente: CEDEX, 1996)

4.3.4.4 Distribución de sedimentos

La forma de distribuir los sedimentos aportados por el río, apartado 4.1.2, es asimétrica lo que hace que se mueva hacia las bahías de L'Ampolla y Fangar en su gran mayoría; pero la forma de hacerlo, provoca que falten aportes en Riumar y Marquesas.

Por lo que forma que adquiere la desembocadura, conjunto de la isla de San Antonio y cabo Tortosa, provoca:

- 1- Sombra del oleaje y vortex en el transporte de sedimentos con un incremento erosivo en las zonas indicadas de Riumar y Marquesas.
- 2- Estado de semiequilibrio forma de la salida y cabo ; lo que provoca, como se ha dicho, una reducción de aportes de sedimento hacia el sur que provoca una onda erosiva acusada en los puntos de mayor transporte, apartado 4.3.3, y cota más baja.



5 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Este capítulo se dedica a analizar el impacto que puede producir el cambio climático sobre la costa del Delta del Ebro. Para analizar los efectos esperables del cambio climático en primer lugar (apartado 5.1) se resume la documentación más general analizada en relación con el cambio climático en la costa (estudios sobre posibles impactos, normativa, recomendaciones de adaptación, etc.). A continuación se especifican para el ámbito del Delta del Ebro, los impactos que pueden generar mayores riesgos y se definen las metodologías de cálculo de cada uno de ellos, para seguidamente estimar su magnitud en diferentes escenarios de emisiones y fechas futuras (apartados 5.2 y 5.3). Finalmente, se resumen las principales conclusiones del estudio y se proponen las líneas generales de actuación para la adaptación.

5.1 BASE DOCUMENTAL (DOCUMENTACIÓN BÁSICA)

Los estudios que, como documentación básica y estratégica, se ocupan de los efectos del cambio climático, y como caso particular, de los efectos en la costa, son:

1. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (Oficina Española de Cambio Climático -OECC, 2005): es el marco general de referencia para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático.
2. Impactos en la Costa Española por Efecto del Cambio Climático (IH Cantabria, 2004): cuya finalidad es establecer políticas y estrategias de actuación en las costas españolas ante el cambio climático.
3. Elaboración de los Mapas de Peligrosidad y Riesgo requeridos por el Real Decreto 903/2010 en la Costa Española (MITERD), Elaboración de los Mapas de Peligrosidad y Riesgos requeridos por el Real Decreto 903/2010 en la Costa Española, 2013): con la finalidad de servir como instrumento adecuado para la posterior Gestión de las Zonas Inundables.
4. Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa española (Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar, 2016): que plantea los objetivos principales y escenarios de proyecto para combatir el cambio climático en las costas españolas.
5. Informe Especial del IPCC sobre Océanos y Criosfera (SROCC), (IPCC, 2019): Informe que actualiza el 5º informe del IPCC (IPCC, 2014) en lo relativo a océanos y criosfera. El trabajo analiza las tendencias y proyecciones de cambio de los principales impactos del cambio climático sobre estos dos elementos.
6. Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos del cambio climático a lo largo de la costa Española (IH Cantabria, 2019): Documento que presenta las proyecciones más recientes de variables climáticas marinas a medio y largo plazo (hasta finales del s. XXI) en la costa española.

A continuación se analiza separadamente cada uno de estos trabajos en lo referente a su afectación a la costa en estudio.



5.1.1 Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Oficina Española de Cambio Climático (2006)

La primera de las fuentes de información a tener en cuenta para analizar los efectos del cambio climático en la costa del Delta del Ebro es el “Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático” (PNACC), de la Oficina Española de Cambio Climático, y que sirve como marco general de referencia para las actividades de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático, de ámbito general en España.

Entre los sectores o sistemas y líneas de actuación que contempla, se encuentran las zonas costeras; con una estimación subjetiva del horizonte de planificación para la adaptación, comprendida entre 10 y 100 años.

Según el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, los principales problemas del cambio climático en las zonas costeras se relacionan con el ascenso del nivel medio del mar (NMM) y los potenciales cambios en la frecuencia y/o intensidad de los temporales.

Con relación a las zonas costeras próximas a la costa del Delta del Ebro, indica: “Un ascenso relativo del NMM de 0,50 m sin respuesta sedimentaria asociada supondría la desaparición de alrededor del 50% del delta del Ebro.”. También se menciona el Delta del Ebro como una de las zonas más amenazadas en el Mediterráneo por inundación en el escenario de ascenso del NMM, aunque los usos agrícolas o de parque natural existentes “podrían permitir la formación de nuevos humedales que compensarían por desplazamiento la previsible pérdida de los que sean anegados.”

Destaca como hecho importante, la elaboración del proyecto de investigación sobre los impactos en la costa española por efecto del cambio climático, promovido por el Ministerio de Medio Ambiente (hoy Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico), que se resume en el apartado siguiente, y que sirve de base para el desarrollo de las principales líneas de actuación del PNACC en las zonas costeras, que se indican a continuación:

- Desarrollo de modelos de respuesta morfodinámica y ecológica de las principales unidades de la costa española, bajo distintos escenarios de cambio climático.
- Cartografía de la vulnerabilidad de la costa española frente al ascenso del NMM bajo distintos escenarios de cambio climático: Identificación, delimitación e inventario de las áreas y elementos más vulnerables por el ascenso del nivel del mar, y su valoración ecológica.
- Evaluación de las estrategias de abandono y retroceso, o de protección, frente a distintos escenarios de ascenso del NMM.
- Evaluación de las opciones de adaptación mediante actuaciones sobre factores relacionados con la estabilidad del litoral, como el mantenimiento de descarga y aportes sólidos de los ríos, como solución al «origen» del problema (la falta de material sedimentario).
- Como solución a los «síntomas» del problema (retroceso o movilidad excesiva de la costa), evaluación de potenciales actuaciones para favorecer la estabilización de playas y dunas, la construcción de obras para delimitar la capacidad de transporte del oleaje incidente y las aportaciones artificiales de sedimentos.

5.1.2 Impactos en la Costa Española por efecto del Cambio Climático, Oficina Española de Cambio Climático y Universidad de Cantabria (IH Cantabria, 2004)

Una fuente de información básica a tener en cuenta a la hora de estudiar los tramos de costa que potencialmente pueden tener problemas en el futuro, es conocer el efecto del cambio climático que, en este contexto, es previsible afecte a la costa del Delta del Ebro. El análisis que de ello se efectúa, se ha hecho utilizando, como fuente primordial y principal, el proyecto realizado por la Universidad de Cantabria (2004) para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar: “Impactos en la costa española por efecto del cambio climático”; realizado en tres fases: Fase I. Evaluación de cambios en la dinámica costera española; Fase II. Evolución de efectos en la costa española; Fase III. Estrategias frente al cambio climático en la costa.

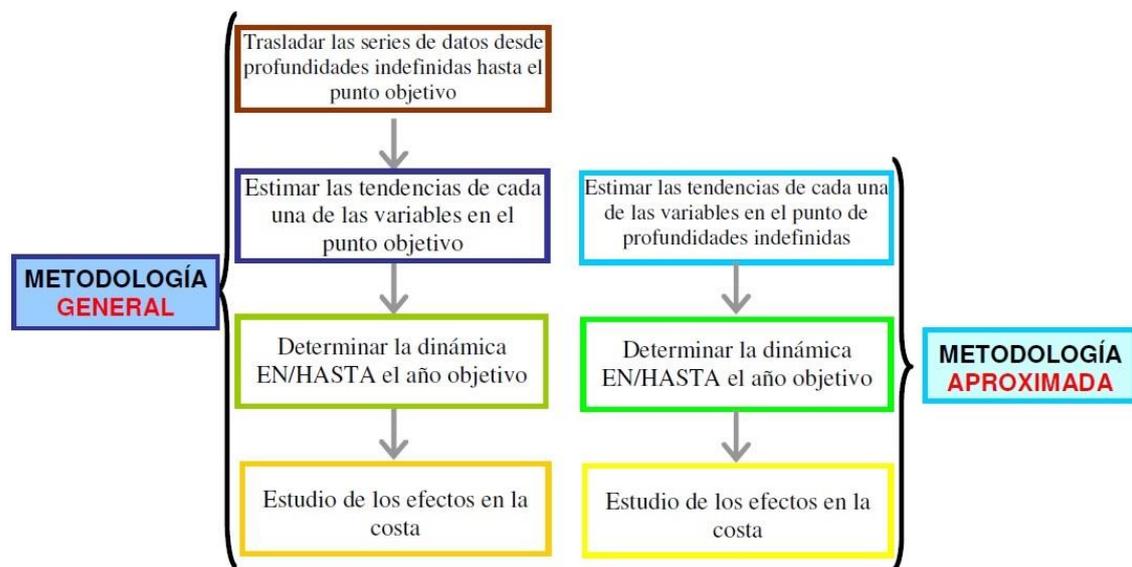


Figura 5.1: Esquema metodológico para la evaluación del efecto del cambio climático en las costas españolas (Fuente: IH Cantabria y DGSC y M, 2004)

Según el último informe del IPCC (AR5) de 2014, la elevación del nivel del mar no será uniforme. Las proyecciones señalan que alrededor del 70% de las costas experimentarán un cambio de nivel del mar de hasta un 20% de diferencia de la subida media del nivel del mar.

La gráfica (Figura 5.2), que estima la elevación media de la superficie del mar según diferentes escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero, muestra que la subida media del nivel del mar se estima estará entre 0,15 y 0,32 m en 2050, y entre 0,25 y 1,0 m en el año 2100; considerando los cuatro escenarios de emisiones (RCP), con sus diferentes bandas de confianza.

Las tasas de elevación medidas, en 2001 para el tercer informe del IPCC (TAR) indicaba una elevación de entre 1 y 2 mm/año para el siglo XX; que fue rectificada sucesivamente en los siguientes 4 (AR4) y 5º (AR5) informe y que, según algunos autores, esta cifra podría incluso ser mayor; por ejemplo 4 mm/año según Dangendorf et al. (2017).

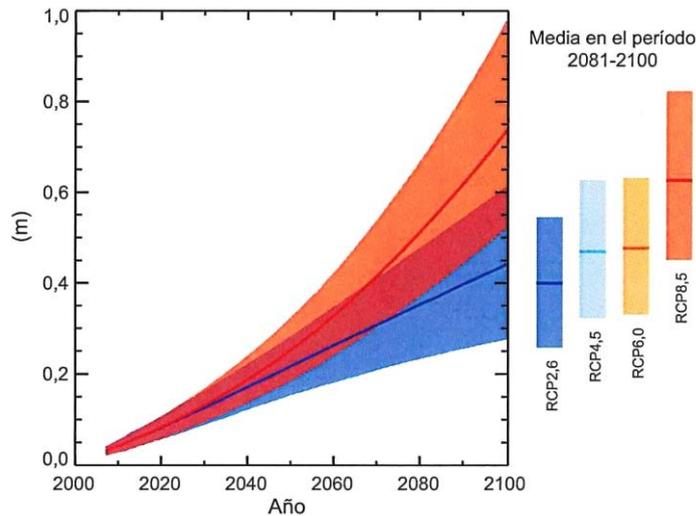


Figura 5.2: Variaciones del nivel medio global del mar estimadas para diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (Fuente: Quinto Informe de Evaluación del IPCC (AR5), 2014)

El análisis teórico de los posibles efectos del cambio climático en el litoral español debe distinguir los diversos tipos de estructuras, contemplándose:

- Playas
- Dunas
- Estuarios, humedales y lagunas
- Obras marítimas

En este marco, el análisis del efecto del cambio climático en las costas del Delta del Ebro no se contempla para las obras marítimas. Las variables más importantes que producen los efectos principales en las playas, dunas y estuarios se observan en las tablas de las Figuras 5.3 a 5.5 adjuntas, provenientes de este estudio y presentación del Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria (GIOC-UC).

ELEMENTO MORFOLOGICO	ELEMENTOS ANALIZADOS	OLEAJE				NIVEL DEL MAR	MAREA METEOROLÓGICA
		RÉGIMEN MEDIO			EXTREMAL		
		ΔH_{12}	ΔH_{RMS}	$\Delta \theta$	$\Delta H_{12-50 \text{ años}}$	NM	ΔMM
PLAYAS	COTA DE INUNDACIÓN				POSIBLE AUMENTO COTA DE INUNDACION	POSIBLE AUMENTO COTA DE INUNDACION	POSIBLE AUMENTO COTA DE INUNDACION
	PERFIL	AUMENTO PROFUNDIDAD DE CORTE POSIBLE RETROCESO EN PLAYAS COLMATADAS				RETROCESO PLAYA	
	FORMA EN PLANTA			BASCULAMIENTO PLAYAS POSIBLE RETROCESO		CAMBIO EN TOMBOLOS SALIENTES Y DOBLES SALIENTES	
	TRANSPORTE LITORAL		VARIACION CAPACIDAD DE TRANSPORTE	VARIACION CAPACIDAD DE TRANSPORTE			

Figura 5.3: Efecto del cambio climático sobre las playas y variables en juego (Fuente: IH Cantabria y DGSC y M, 2004)

ELEMENTO MORFOLÓGICO	ELEMENTOS ANALIZADOS	VIENTO		NIVEL DEL MAR
		REGIMEN MEDIO		
		ΔU_{RMS}	$\Delta \theta$	NM
DUNAS	TRANSPORTE EÓLICO	VARIACIÓN TASA DE CRECIMIENTO	VARIACIÓN TASA DE CRECIMIENTO	
	EROSIÓN DUNAR			RETROCESO DUNAR

Figura 5.4: Efecto del cambio climático sobre las dunas y variables en juego (Fuente: U. Cantabria y D. Gral. de Sostenibilidad de la Costa y del Mar, 2004)

ELEMENTO MORFOLÓGICO	ELEMENTOS ANALIZADOS	OLEAJE	NIVEL DEL MAR	CAUDAL MEDIO RÍO
		REGIMEN MEDIO		
		ΔH_{RMS}	NM	V_r
ESTUARIOS	PRISMA DE MAREA		POSIBLE AUMENTO DEL PRISMA DE MAREA	
	SECCIÓN DE EQUILIBRIO		POSIBLE AUMENTO DEL ÁREA DE EQUILIBRIO	
	BAJO EXTERIOR	CAMBIO EN LA FORMA Y POSICIÓN DEL BAJO	POSIBLE AUMENTO DEL VOLUMEN DEL BAJO	
	PLAYA ADYACENTE		RETROCESO ADICIONAL POR EL DEFICIT DE ARENA EN EL BAJO EXTERIOR	
	CIRCULACIÓN ESTUARINA		POSIBLE CAMBIO EN EL TIPO DE CIRCULACIÓN	POSIBLE CAMBIO EN EL TIPO DE CIRCULACIÓN
	EXTENSIÓN CUÑA SALINA		AUMENTO DE LA EXTENSIÓN DE LA CUÑA	DISMINUCIÓN DE LA EXTENSIÓN DE LA CUÑA

Figura 5.5: Efecto del cambio climático sobre los estuarios y variables en juego (Fuente: IH Cantabria y DGSC y M, 2004)

5.1.3 Mapas de Peligrosidad y Riesgo requeridos por el Real Decreto 903/2010

Una tercera fuente de información a tener en cuenta en el análisis sobre los efectos del cambio climático, es el trabajo denominado “Elaboración de los Mapas de Peligrosidad y Riesgo requeridos por el Real Decreto 903/2010 en la Costa Española”, en el que se estudian las zonas costeras con riesgo de inundación. No obstante, en este caso no se ha utilizado directamente para caracterizar este efecto en la costa del Delta del Ebro debido a que en su primera fase estos mapas no se consideró la variación del nivel del mar debida al cambio climático.

5.1.4 Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española (D. Gral. de Sostenibilidad de la Costa y el Mar, 2016)

Los objetivos principales de esta Estrategia se enuncian en el capítulo 2 de la primera parte. En él se enumeran en primer lugar los fines perseguidos por la Ley de Costas de 1988 y su modificación de 2013:



- a) Determinar el dominio público marítimo-terrestre y asegurar su integridad y adecuada conservación, adoptando, en su caso, las medidas de protección y restauración necesarias y, cuando proceda, de adaptación, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático.
- b) Garantizar el uso público del mar, de su ribera y del resto del dominio público marítimo-terrestre, sin más excepciones que las derivadas de razones de interés público debidamente justificadas.
- c) Regular la utilización racional de estos bienes en términos acordes con su naturaleza, sus fines y con el respeto al paisaje, al medio ambiente y al patrimonio histórico.
- d) Conseguir y mantener un adecuado nivel de calidad de las aguas y de la ribera del mar.

Como se indica a continuación en el mencionado documento, los objetivos generales de la citada Estrategia se asientan sobre las bases expuestas anteriormente.

La Estrategia para la Adaptación de la Costa a los Efectos del Cambio Climático concreta los anteriores objetivos generales planteando dos fines, como se enuncia a continuación:

- 1 Incrementar la resiliencia de la costa española al cambio climático y a la variabilidad climática.
- 2 Integrar la adaptación al cambio climático en la planificación y gestión de la costa española.

Se define la resiliencia como la “Capacidad de los sistemas sociales, económicos y naturales de hacer frente a un evento, tendencia o perturbación, respondiendo o reorganizándose de manera que se mantengan sus funciones esenciales, identidad y estructura, manteniendo también su capacidad de adaptarse, aprender y transformarse (IPCC, 2014)”.

En la segunda parte: “Objetivos específicos, directrices generales y medidas” en el apartado 2.3 presenta los “Factores de cambio considerados” en una tabla (Figura 5.6)

FACTORES CLIMÁTICOS	INDICADOR (1)	TENDENCIAS (2)	PROYECCIONES (3)
Nivel del mar	Nivel del mar relativo local	Series históricas	Valores recomendados por el IPCC modificados y regionalizados
Tormentas (ciclones extratropicales)	Intensidad, frecuencia, trayectoria	Series históricas	Valores regionalizados si están disponibles o recomendados por el IPCC
Viento	Intensidad, dirección	Series históricas	Valores regionalizados si están disponibles o recomendados por el IPCC
Olas	Intensidad dirección	Series históricas	Valores regionalizados si están disponibles o recomendados por el IPCC
Niveles del mar extremos	Nivel del mar total	Series históricas	Valores regionalizados si están disponibles o calculados a partir de las series históricas de marea meteorológica y contribución del oleaje y proyecciones de nivel medio del mar regionalizadas
Temperatura del mar en superficie	Temperatura del mar medida en superficie	Series históricas	Valores regionalizados si están disponibles o los recomendados por el IPCC
Aportaciones de agua dulce superficial y subterránea	Caudales y nivel freático	Series históricas	Valores regionalizados si están disponibles o inferidos a partir de proyecciones de precipitaciones
Aumento de la concentración de CO ₂ en el mar	Concentración de CO ₂ , pH	Series históricas	Valores regionalizados si están disponibles o recomendados por el IPCC

Tabla 8. Factores climáticos de cambio considerados en la Estrategia

Figura 5.6: Factores climáticos de cambio climático (Fuente: MAPAMA, 2016)

Además, se indica que debe considerarse uno de los escenarios y proyecciones de emisión de gases de efecto invernadero que contemplan los informes del IPCC, actual es el 5º de 2014 (AR5), que se muestra en la Figura 5.2. A continuación, se enumeran los impactos incluidos en la evaluación de los efectos del cambio climático en la costa, que se presentan en una tabla (Figura 5.7).

IMPACTOS	FACTORES INCLUIDOS
Inundación permanente y sus consecuencias	Nivel medio del mar
Inundación temporal y sus consecuencias	Nivel medio del mar, marea meteorológica y contribución del oleaje (run-up/set-up)
Erosión costera e impacto en sistemas dunares	Nivel medio del mar, niveles extremos, oleaje (cambio en altura y dirección), viento
Intrusión salina y cambios en el nivel freático	Nivel medio del mar, inundación por eventos extremos, precipitación, caudal
Cambios en humedales y marismas	Nivel medio del mar, caudal del río, nivel freático
Cambios en la operatividad y estabilidad en obras de protección de la costa	Nivel medio del mar, niveles extremos, oleaje (intensidad y dirección)
Cambios en la estratificación y circulación	Nivel medio del mar, caudales, salinidad, temperatura
Migración y mortalidad de especies costeras y de aguas de transición	Temperatura, nivel medio del mar, eventos extremos
Modificaciones en la calidad del agua y salinidad	Salinidad, temperatura, escorrentía, caudal, nivel freático eventos extremos
Alteración de las aportaciones sedimentarias de los ríos	Precipitación, caudal, escorrentía
Alteraciones de la circulación y aportaciones de nutrientes	Escorrentía, salinidad, caudal, temperatura
Cambios del pH del agua	Cambios en ph por absorción de CO ₂

Tabla 9. Impactos considerados en la Estrategia

Figura 5.7: Impactos incluidos en la evaluación de los efectos del cambio climático en la costa (Fuente: MAPAMA, 2016).



El siguiente escalón es determinar, en cada punto, los niveles de riesgo y sus consecuencias si no se efectúa ninguna adaptación. Igualmente, se resumen en dos tablas (Figura 5.8 y Figura 5.9).

NIVEL DE RIESGO EN AUSENCIA DE ADAPTACIÓN	CARACTERÍSTICAS
BAJO	Se define como sistemas, áreas o sectores en la costa en los que el aumento del nivel de riesgo con respecto al año base para un impacto o varios impactos agregados sea < 10%
MEDIO	Se define como sistemas, áreas o sectores en la costa en los que el aumento del nivel de riesgo con respecto al año base para un impacto o varios impactos agregados esté entre un 10% y un 25%
ALTO	Se define como sistemas, áreas o sectores en la costa en los que el aumento del nivel de riesgo con respecto al año base para un impacto o varios impactos agregados esté entre un 25% y un 60%
MUY ALTO	Se define como sistemas, áreas o sectores en la costa en los que el aumento del nivel de riesgo con respecto al año base para un impacto o varios impactos agregados esté entre un 60% y un 90%
EXTREMO	Se define como sistemas, áreas o sectores en la costa en los que el aumento del nivel de riesgo con respecto al año base para un impacto o varios impactos agregados sea > 90%

Tabla 10. Niveles de riesgo considerados en la Estrategia

Figura 5.8: Niveles de riesgo debido a los efectos del cambio climático en la costa (Fuente: MAPAMA, 2016)

NIVEL DE CONSECUENCIAS EN AUSENCIA DE ADAPTACIÓN	CARACTERÍSTICAS
PEQUEÑAS	En sistemas naturales: Sin daños en el estado/integridad del sistema. Daños o cambios menores en la funcionalidad/servicios aportados por el sistema, recuperables de manera natural en corto plazo. En sistemas socioeconómicos: Sin daños sobre el estado/integridad del sistema o pérdidas económicas o de funcionalidad despreciables de muy corto plazo y fácilmente asumibles.
MODERADAS	En sistemas naturales: Sin daños o daños menores temporales sobre el estado/integridad del sistema o reducciones en la funcionalidad/servicios aportados por el sistema recuperable de forma natural. En sistemas socioeconómicos: Sin daño o daños menores temporales sobre la integridad del sistema o pérdidas de funcionalidad/servicio o económicas que pueden ser restauradas.
SEVERAS	En sistemas naturales: Daños directos en el estado/integridad del sistema e importante pérdida de funcionalidad/servicios que no pueden restaurarse al 100% o requieren la intervención del hombre para su recuperación. En sistemas socioeconómicos: Daños directos e importantes en la estado/integridad del sistema e importante pérdida temporal o permanente parcialmente, de funcionalidad/servicio de los sistemas que conlleva elevadas pérdidas económicas y afcción sobre la actividad de la población. La recuperación no es factible al 100% salvo con importantes costes económicos no asumibles en algunos casos.
IRREVERSIBLES	En sistemas naturales: Pérdida permanente y no recuperable de hábitat, ecosistema o servicios ecosistémicos principales por mortalidad o por desaparición permanente de las condiciones naturales para su existencia. En sistemas socioeconómicos: Pérdida de vidas humanas y pérdida del estado/integridad del sistema con cese definitivo de funcionalidad /servicios o pérdidas económicas que no permiten su recuperación en las condiciones presentes.

Tabla 11. Nivel de consecuencias negativas en ausencia de adaptación

Figura 5.9: Consecuencia de los efectos del cambio climático en la costa (Fuente: MAPAMA, 2016)



El siguiente escalón es definir los niveles de riesgo y, finalmente, se plantea una serie de propuestas englobando las opciones en tres grandes grupos:

- 1) Protección (proteger la zona de riesgo)
- 2) Acomodación (se mantiene los elementos pero se modifica sus usos)
- 3) Retroceso (abandono planificado de la zona)

La última parte de esta Estrategia para la Adaptación de la Costa a los Efectos del Cambio Climático se dedica a la “Implementación y seguimiento” en el que se introduce un programa de seguimiento con indicadores medioambientales.

5.1.5 Informe Especial del IPCC sobre Océanos y Criosfera (SROCC) (IPCC, 2019)

Este es el tercero de una serie de informes especiales elaborados en el sexto ciclo de evaluación del IPCC, preparado bajo la dirección científica conjunta de los Grupos de Trabajo I y II del IPCC, con el apoyo de la Unidad de Apoyo Técnico del Grupo de Trabajo II del IPCC.

El documento, de más de 1000 páginas, incluye un resumen para responsables de las políticas sobre el tema, donde se presentan las principales conclusiones en relación con los riesgos del cambio climático, basadas en el análisis de las tendencias históricas y proyecciones de cambio de diversas variables ambientales (nivel del mar medio global, temperatura, oxígeno, pH, calor, etc. (Figura 5.10).

De los resultados que se presentan, destacan la aceleración del incremento del nivel del mar global en las últimas décadas debido al incremento de las tasas de pérdida de masa helada en Groenlandia, la Antártida y glaciares y a la expansión térmica de los océanos (aumento de volumen por reducción de la densidad debido al aumento de temperatura).

Además, también se menciona el incremento de ciclones tropicales y extremos en oleaje, los cuales, unidos a la elevación del nivel del mar, aumentan los impactos de eventos extremos, disminuyendo el periodo de retorno asociado a una magnitud de evento concreta.

Por lo que a la subida del nivel del mar respecta, sus proyecciones medias globales no han variado significativamente. Por un lado, sigue existiendo bastante incertidumbre en los resultados, que aumenta conforme se alejan del presente; por otro, los valores medios no son muy diferentes a los del 5º informe del IPCC (IPCC, 2014), si bien muestran un ligero aumento. A continuación se presenta un extracto de la conclusión B3.1 del SROCC (IPCC, 2019):

“La proyección de subida del nivel medio del mar global en el escenario RCP2.6 es de 0.39 m (0.26–0.53 m rango probable) para el periodo 2081–2100, y 0.43 m (0.29–0.59 m, rango probable) en 2100 con respecto al periodo 1986–2005. Para el escenario RCP8.5, la proyección de subida es de 0.71 m (0.51–0.92 m, rango probable) para 2081–2100 y 0.84 m (0.61–1.10 m, rango probable) en 2100. Las proyecciones de subida del nivel medio del mar son mayores, 0.1 m comparadas con el 5º informe IPCC en el escenario RCP8.5 en 2100...”

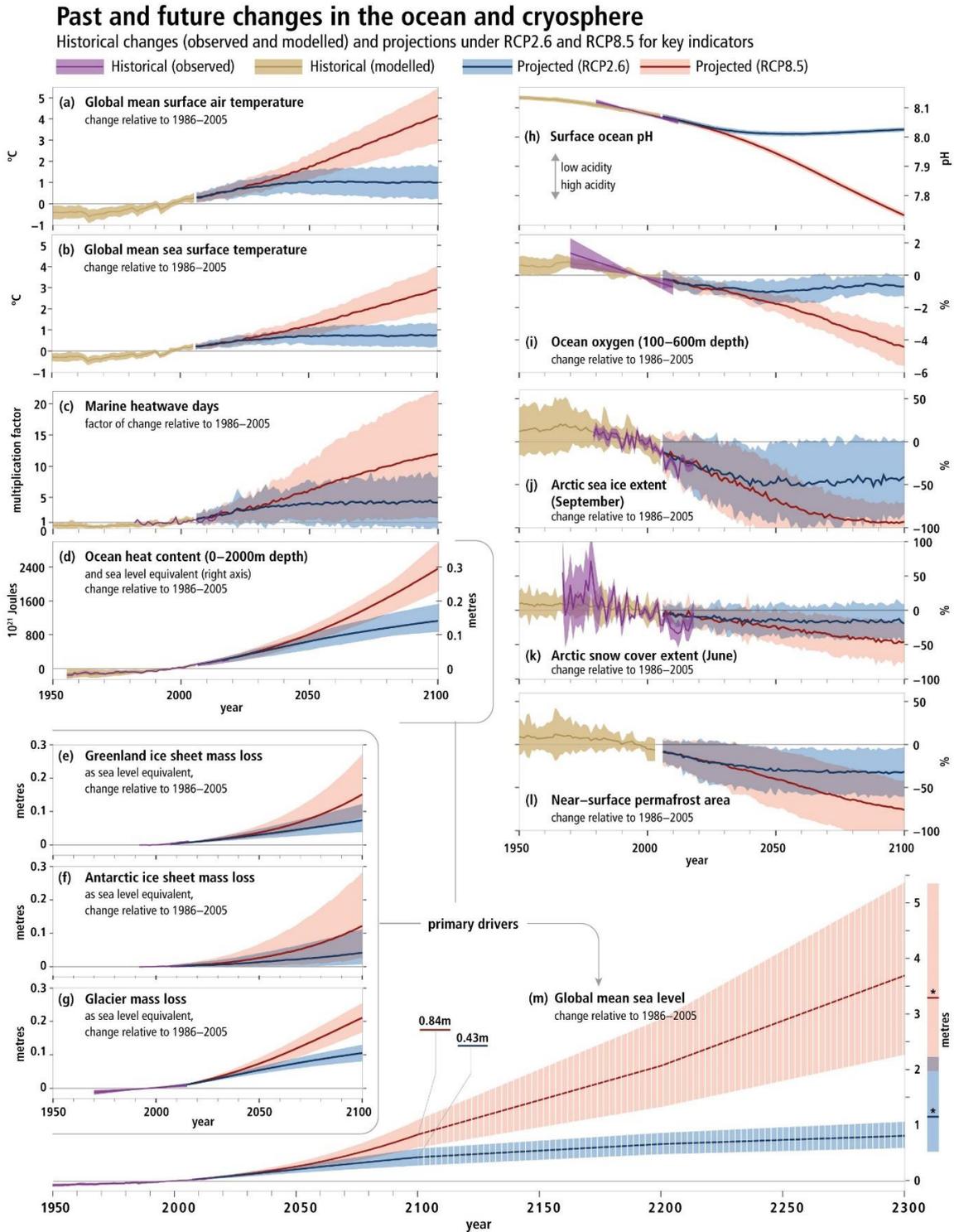


Figura 5.10. Cambios históricos y proyecciones de cambio en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 (Fuente: IPCC, 2019)

5.1.6 Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos del cambio climático a lo largo de la costa Española (IH Cantabria-MITERD, 2019)

Este informe de IH Cantabria-MITERD (2019), fue realizado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH-UC) por encargo del Ministerio para la Transición Ecológica; en concreto el documento emitido en octubre de 2019 tiene como objetivo determinar las proyecciones de variables marinas a lo largo de la costa española para su uso en modelos de impacto (estudio en elaboración actualmente). En él se señala la erosión y la inundación como principales impactos del cambio climático en la costa, que no solo son dependientes de la subida del nivel del mar, sino también de cambios en el oleaje y la marea meteorológica.

Respecto al nivel medio del mar, el citado informe indica la existencia de patrones regionales significativos respecto de los patrones globales a tener en cuenta en las proyecciones. Sobre la marea meteorológica, se menciona la necesidad de obtener mayor información, ya que no se incluía este tipo de datos en el Quinto informe de evaluación del IPCC (AR5). En referencia a las proyecciones de oleaje, se observa la necesidad de una mayor resolución espacial respecto de la de las existentes en el informe IPCC (AR5).

En la primera parte del documento se describen las bases de datos históricas de clima que se utilizan para validar los modelos climáticos, así como para la corrección del sesgo y el análisis de comportamientos futuros. También se describen los modelos usados para caracterizar el clima durante el siglo XXI. A continuación, se detalla la metodología seguida para obtener las proyecciones de clima marino a través de cada una de las partes (Figura 5.11).

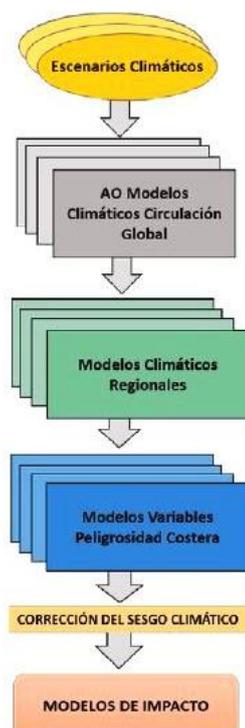


Figura 5.11: Esquema general de metodología para proyecciones climáticas marinas (Fuente: IH Cantabria-MITERD, 2019)



Las siguientes secciones del informe describen los métodos de obtención de las proyecciones para cada una de las variables: oleaje, marea meteorológica, nivel medio del mar y temperatura superficial. Se toma para ello los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 del IPCC (AR5), correspondientes a la estabilización de las emisiones mucho antes de 2100 (RCP4.5), y al escenario de línea de base sin uso de medidas de mitigación o escenario pesimista, respectivamente.

En la última sección se presentan los resultados para cada una de las variables. Las proyecciones de las variables marinas se dan en términos de porcentaje respecto a los valores medios en el periodo de control para dos periodos: corto-medio plazo (2026 - 2045), y largo plazo (2081 - 2100). El periodo de control abarca desde el año 1986 a 2005 para el nivel medio del mar y temperatura superficial, y desde el año 1985 a 2005 para el resto de variables.

De forma general, para todos los escenarios y periodos, se pueden resumir los efectos observados en los resultados para cada variable en el ámbito nacional como sigue:

- Tanto el valor medio como el percentil del 99% de la altura significativa de oleaje se vería reducida a corto y largo plazo, salvo en el Mar de Alborán y Canarias.
- El valor medio del periodo de pico de oleaje disminuiría a corto plazo, salvo en el Mar de Alborán y zonas del Levante y disminuiría también de forma generalizada a largo plazo salvo en el Mar de Alborán.
- El percentil del 99.9% del periodo de pico se reduciría a corto plazo salvo en el Golfo de Cádiz, Galicia y el Mar Cantábrico, mientras que la reducción sería general a largo plazo.
- La dirección media de oleaje no presentaría cambios significativos, salvo cambios locales en el Mediterráneo.
- El percentil del 99.9% de la marea meteorológica presentaría una disminución general, salvo en las Islas Canarias. A largo plazo, disminuiría hasta un 20% en algunas zonas del Mediterráneo y Golfo de Cádiz.
- El aumento del nivel medio del mar presentaría valores a corto plazo de: 0,13 - 0,17m ($\pm 0,03$ m, desviación estándar) y a largo plazo de 0,38 - 0,5 m ($\pm 0,1$ m, desviación estándar) para el escenario RCP4.5 y de 0,52 - 0,68 ($\pm 0,15$ m, desviación estándar) para el escenario RCP8.5.
- La temperatura superficial del mar presentaría un aumento generalizado, más intenso en las Islas Baleares.

Se incluyen a continuación, a modo de ejemplo, los mapas de proyección del nivel medio del mar (Figura 5.12) y la comparación de las proyecciones con el periodo de control para la marea meteorológica (Figura 5.13).

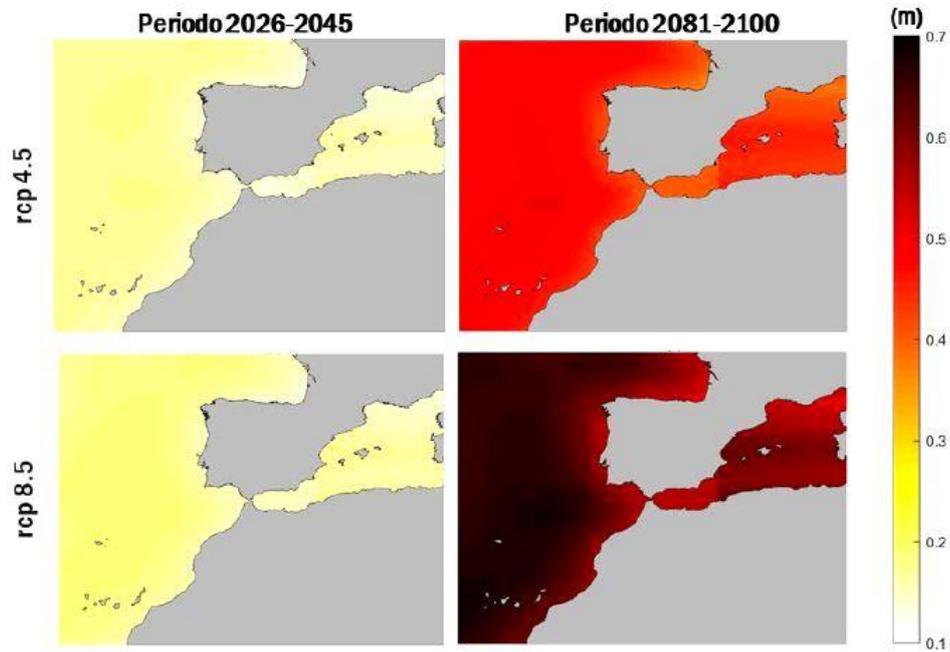


Figura 5.12: Aumento del nivel del mar (NM) para cada periodo y escenario (Fuente: IH Cantabria-MITERD, 2019)

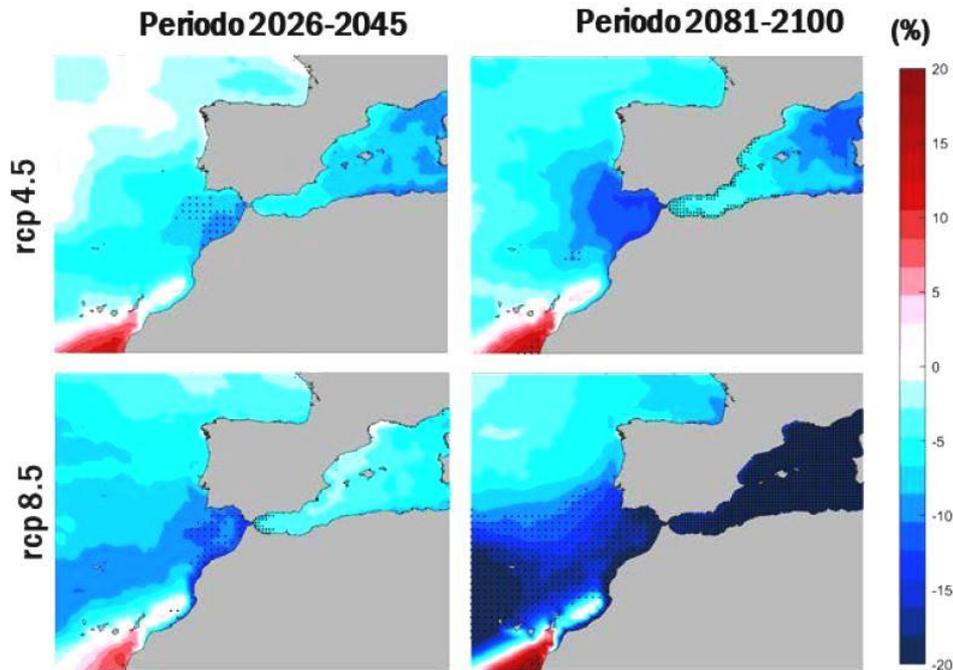


Figura 5.13: Cambios en el percentil 99% de la marea meteorológica (MM) de cada periodo y escenario respecto al periodo de referencia (Las zonas punteadas indican coincidencia de los modelos climáticos en el signo del cambio por encima del 80%) (Fuente: IH Cantabria-MITERD, 2019)

Las dinámicas marinas contempladas por el visor c3e son: el oleaje, el nivel del mar y la temperatura superficial del mar. Respecto al oleaje, para la altura de ola significativa y el periodo, así como la dirección el visor recoge valores medios y estadísticos representativos de valores extremos; mientras, para el nivel del mar se proporcionan como variables el nivel medio del mar, la marea meteorológica y el nivel del mar compuesto. Por último, la variación de la temperatura superficial del mar consta de una sola variable con idéntica denominación.

5.2.1.1 Variación del oleaje con el cambio climático

Los valores obtenidos de las variables de oleaje se muestran en las Tablas 5.1 a 5.4; que son los valores medios para el periodo de control (columna "Actual"), y las variaciones respecto a dicho periodo, tanto para la media ($\Delta(1985-2005)$), como para los límites inferior y superior del intervalo de confianza ([IC5%], [IC95%]). Esta nomenclatura, así como el uso de flechas verticales de sentido opuesto para los aumentos por encima del umbral representativo del 25% superior y por debajo del 25% inferior de los valores se mantendrá a lo largo de las restantes tablas de esta sección

Las variables que se representan la dinámica del oleaje (Tablas 5.1 a 5.4) consisten en: el valor medio de la altura de ola significativa ($H_{s,m}$); el percentil del 99,9% de la altura de ola significativa ($H_{s,99.9\%}$); el valor medio del periodo de pico (T_p); el percentil del 99,9% del periodo de pico ($T_{p,99.9\%}$) y el valor medio de la dirección de oleaje (Dir).

Hemidelta norte

Periodo	1985-2005	2026-2045							
		Escenario	Actual	RCP4.5			RCP8.5		
				$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
$H_{s,m}$ (m)	0.2475	-0.0042	-0.0139	0.0056	-0.0002	-0.0052	0.0049		
$H_{s,99.9\%}$ (m)	1.122	-0.0106	-0.0325	0.0113	-0.0056	-0.0315	0.0203		
Dir (°)	77.439	↑ 1.1077	↓ -0.3012	↑ 2.5166	↑ 0.5859	↓ -0.0818	↑ 1.2536		
$T_{p,m}$ (s)	5.0785	-0.0100	-0.0333	0.0132	0.0168	-0.0436	0.0773		
$T_{p,99.9\%}$ (s)	11.236	-0.0468	↓ -0.2057	0.1122	0.0534	↓ -0.1886	0.2953		

Tabla 5.1: Variación del oleaje en el Hemidelta norte, a corto plazo. Valores medios de las variables de oleaje en el periodo de control y variaciones medias e intervalos de confianza (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)

Periodo	1985-2005	2081-2100							
		Escenario	Actual	RCP4.5			RCP8.5		
				$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
$H_{s,m}$ (m)	0.2475	-0.0082	-0.0148	-0.0016	-0.0106	-0.0159	-0.0053		
$H_{s,99.9\%}$ (m)	1.122	-0.0078	-0.0354	0.0197	-0.0036	-0.0311	0.0238		
Dir (°)	77.439	↑ 1.6856	0.2037	↑ 3.1676	3.0747	1.5503	↑ 4.5991		
$T_{p,m}$ (s)	5.0785	-0.0273	-0.0686	0.0140	-0.0553	↓ -0.1056	-0.0050		
$T_{p,99.9\%}$ (s)	11.236	↓ -0.1156	↓ -0.3664	0.1351	↓ -0.2501	↓ -0.4190	-0.0813		

Tabla 5.2: Variación del oleaje en el Hemidelta norte, a largo plazo. Valores medios de las variables de oleaje en el periodo de control y variaciones medias e intervalos de confianza (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)



Hemidelta sur

Periodo	1985-2005	2026-2045					
	Actual	RCP4.5			RCP8.5		
		$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
$H_{s,m}$ (m)	0.3972	-0.0099	-0.0221	0.0022	-0.0037	-0.0108	0.0034
$H_{s,99.9\%}$ (m)	1.6808	-0.0292	↓ -0.1721	0.1136	0.0329	-0.1150	0.1807
Dir (°)	134.8658	↓ -0.8570	↓ -4.6414	↑ 2.9274	↓ -1.6908	↓ -3.8729	↑ 0.4914
$T_{p,m}$ (s)	5.0011	-0.0123	-0.0432	0.0185	0.0167	-0.0356	0.0689
$T_{p,99.9\%}$ (s)	11.236	-0.0264	-0.1528	0.0999	0.0738	-0.1257	↑ 0.2734

Tabla 5.3. Variación del oleaje en el Hemidelta sur, a corto plazo. Valores medios de las variables de oleaje en el periodo de control y variaciones medias e intervalos de confianza (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)

Periodo	1985-2005	2081-2100					
	Actual	RCP4.5			RCP8.5		
		$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
$H_{s,m}$ (m)	0.3972	-0.0160	-0.0242	-0.0077	-0.0216	-0.0277	-0.0155
$H_{s,99.9\%}$ (m)	1.6808	-0.0450	-0.1747	0.0846	-0.0095	-0.1681	0.1490
Dir (°)	134.8658	↓ -0.4453	↓ -4.0682	↑ 3.1777	↓ -1.1792	↓ -4.7879	↑ 2.4296
$T_{p,m}$ (s)	5.0011	-0.0332	-0.0668	0.0005	-0.0560	-0.0875	-0.0244
$T_{p,99.9\%}$ (s)	11.236	-0.0784	↓ -0.2101	0.0533	-0.2386	↓ -0.4637	-0.0135

Tabla 5.4. Variación del oleaje en el Hemidelta sur, a largo plazo. Valores medios de las variables de oleaje en el periodo de control y variaciones medias e intervalos de (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)

De los resultados recogidos en las tablas anteriores se puede concluir que para todos los periodos y escenarios sería más probable la reducción de la altura significativa de oleaje en régimen medio, aunque su magnitud es de escasos cm.

También se observa para los valores extremos que la reducción de altura de ola sería el efecto más generalizado y que las variaciones se mueven en rangos que alcanzan del orden de dm en el nodo del hemidelta sur, dándose el límite más acusado de la variación en el escenario RCP8.5 a corto plazo, si bien la reducción es muy pequeña (menos de 5 cm).

Las variaciones de los valores medios de la dirección media del oleaje no son excesivos, si bien la variabilidad es imponente; así, para el escenario RCP4.5 a corto plazo en el hemidelta sur, y para el escenario RCP8.5 a largo plazo en ambos hemideltas, podrían alcanzarse variaciones cercanas a los 5°. Por tanto, puede concluirse que este dato presenta una gran incertidumbre en el entorno del Delta del Ebro.

El periodo de pico podría disminuir en general, tanto en régimen medio como en el extremal; salvo para el escenario RCP8.5 a corto plazo, aunque las variaciones son muy poco significativas, ya que se encuentran por debajo del orden de los segundos.

5.2.1.2 Variación del nivel del mar con el cambio climático

Las variables consideradas para caracterizar la dinámica del nivel del mar debido al cambio climático, son: el nivel medio del mar sin oleaje (MSL – Mean Sea Level, por sus siglas en inglés) y el percentil del 99,9% de la marea meteorológica (MM_{99,9%}).

El visor presenta como resultados los incrementos de los valores medios y los intervalos de confianza para las proyecciones en cada uno de los periodos bajo ambos escenarios, recogidos en las Tablas 5.5 a 5.8

Hemidelta norte

Periodo	2026-2045					
	RCP4.5			RCP8.5		
	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
MSL (m)	0.15	0.14	↑ 0.16	0.16	0.15	↑ 0.17
MM _{99,9%} (m)	-0.03	↓ -0.04	-0.02	-0.01	↓ -0.04	0.02

Tabla 5.5: Variación media y límites inferior y superior del intervalo de confianza para el nivel del mar a corto-medio plazo y cada escenario en hemidelta norte (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)

Periodo	2081-2100					
	RCP4.5			RCP8.5		
	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
MSL (m)	0.43	0.28	↑ 0.58	0.58	0.39	↑ 0.78
MM _{99,9%} (m)	-0.02	↓ -0.04	0.00	-0.05	↓ -0.07	-0.03

Tabla 5.6: Variación media y límites inferior y superior del intervalo de confianza para el nivel del mar a largo plazo y cada escenario en hemidelta norte (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)

Hemidelta sur

Periodo	2026-2045					
	RCP4.5			RCP8.5		
	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
MSL (m)	0.15	0.14	↑ 0.16	0.16	0.15	↑ 0.17
MM _{99,9%} (m)	-0.03	↓ -0.04	-0.01	-0.01	↓ -0.03	0.02

Tabla 5.7: Variación media y límites inferior y superior del intervalo de confianza para el nivel del mar a corto-medio plazo y cada escenario en hemidelta sur (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)



Periodo	2081-2100					
	RCP4.5			RCP8.5		
	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]	$\Delta(1985-2005)$	[IC5%]	[IC95%]
MSL (m)	0.43	0.28	↑ 0.58	0.58	0.39	↑ 0.78
MM _{99.9%} (m)	-0.01	↓ -0.03	0.00	-0.04	↓ -0.06	-0.03

Tabla 5.8: Variación media y límites inferior y superior del intervalo de confianza para el nivel del mar a largo plazo y cada escenario en hemidelta sur (rojo: aumento/ azul: disminución) (Fuente: adaptado de <http://www.c3e.ihcantabria.com/>)

De los resultados referentes al nivel del mar se observa que las variaciones serían muy similares en las dos zonas de estudio, alrededor de los 15 cm de aumento, para ambos escenarios en el corto-medio plazo. En el periodo a largo plazo el máximo aumento sería de unos 58 cm en el escenario de estabilización y se podría alcanzar hasta 78 cm de incremento en la zona para el escenario pesimista.

El estadístico correspondiente a los valores extremos de la marea meteorológica (percentil del 99.9%) muestra reducciones casi imperceptibles, del orden de los cm, en todos los periodos y escenarios.

En conclusión, se puede indicar que el régimen medio de oleaje no presenta variaciones significativas y en régimen extremal la altura de ola podría verse incluso reducida, aunque existe una incertidumbre no despreciable en los resultados, con límites de confianza del orden de los dm tanto de reducción como de incremento. Por otro lado, la otra variable que podría tener incidencia en la costa debido al cambio climático es la dirección media del oleaje, que podría verse modificada hasta los 5°, con consecuencias sobre el transporte de sedimentos y la morfología de las playas.

En cualquier caso, el principal impacto esperado es el relativo a la subida del nivel del mar, que conllevaría tanto el retroceso de la línea de costa como un aumento en la frecuencia y los daños de la inundación a los terrenos agrícolas y urbanizaciones aledañas así como la rotura de las barras de Trabucador e Illa de Buda. Se puede resaltar a este respecto la reducción del periodo de retorno de eventos extremos asociados a alturas significantes de ola y mareas meteorológicas que en la actualidad serían considerados regímenes medios, por la adición de la componente de la subida del nivel medio del mar al nivel total incidente en la zona.

5.2.2 Estudios específicos sobre el efecto de la subida del nivel del mar en el perfil de playa

El principal efecto de la subida del nivel del mar debido al cambio climático sobre la zona costera del Delta del Ebro, retroceso de la línea de orilla, ha sido analizado por varios estudios (capítulo 2). Siendo los más relevantes: GENCAT (2008) y LIM (2011)

En el estudio de la Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge (GENCAT, 2008), el retroceso se calcula utilizando la regla de Bruun (Bruun, 1962), suponiendo el perfil de equilibrio de Dean (Dean, 1977) y una profundidad de cierre determinada por la ecuación de Birkemeier (Birkemeier, 1985). Se considera el escenario A1B del IPCC para la subida del nivel medio del mar global: 15 cm de subida para 2050; y dos casos de ascenso, 40 cm y 100 cm (escenario pesimista) para el año 2100. Los



resultados de dicho estudio para varios puntos de la costa del Delta se muestran en una tabla (Figura 2.28). El citado informe de GENCAT, 2008 así como otros informes donde se recogen los mismos resultados (IH, 2009; IHAC, 2011; y OCCC, 2017) se han descrito con mayor detalle en el Capítulo 2. De acuerdo con estos resultados, en concreto, el trabajo de IHAC (2011) se concluye que el retroceso medio en la desembocadura del Río Ebro para un aumento del nivel del mar debido al cambio climático de 15 cm hasta el año 2050 tendría un valor medio de 10,15 m.

Estudios posteriores, como el del Laboratorio de Ingeniería Marítima de la Universidad Politécnica de Barcelona (LIM, 2011), aplican de nuevo la regla de Bruun para caracterizar la respuesta de la costa a la subida del mar considerando también la subsidencia, de 0,15 m hasta 2050, de los terrenos en el Delta bajo los escenarios bajo medio y alto (Figura 2.66). Por tanto, la subida relativa del nivel del mar para 2050, teniendo en cuenta una subsidencia de 0,15 m, tendría un efecto relativo de subida del nivel del mar sobre la costa del Delta entre 0,25 m y 0,35 m en 2050, dependiendo del escenario considerado.

En este estudio (LIM, 2011), para el cálculo del retroceso de la orilla se consideran perfiles promediados con observaciones tomadas durante 4 años, representativos de cada zona (Figuras 5.15 y 5.16). Los resultados se muestran en la Figura 5.17, para cada zona en la que el estudio ha dividido la costa del Delta (Figura 2.52).

		Escenario RSLR ₂₀₅₀ (m)		
		Low	Medium	High
sección	pend	0.25	0.30	0.35
Z1(P8)	0.008	31	37	44
Z1(P22)	0.007	36	43	50
Z2	0.004	62	75	87
Z3	0.004	62	75	87
Z4	0.007	36	43	50
Z5	0.007	36	43	50
Z6	0.004	62	75	87
Z7(P39)	0.004	62	75	87
Z7(P22)	0.006	42	50	58
Z7(P2)	0.02	12	15	17

Tabla 6.3. Previsión del retroceso de la línea de orilla para las diferentes secciones a lo largo de la costa del Delta del Ebro para el año 2050 bajo diferentes escenarios de RSLR.

Figura 5.17: Retrocesos esperados de la línea de costa en diferentes zonas del Delta del Ebro, para diferentes escenarios de subida del nivel del mar (Fuente: LIM, 2011)

Como se explica en este estudio (LIM, 2011): “Estos desplazamientos de la línea de costa bajo el efecto del RSLR según el modelo de Bruun son sólo aplicables a aquellas partes capaces de responder a las nuevas condiciones o lo que es lo mismo, para la costa arenosa externa. Las costas pasivas, como serían las formadas por arcillas o fangos o, sin influencia significativa de la acción del oleaje que les permita responder a una variación en el nivel, permanecerían estáticas y, en consecuencia, la respuesta básica al RSLR sería su inundación en función de su topografía.” Por tanto, se presentan a continuación las estimaciones de inundación encontradas en la literatura al respecto para el Delta del Ebro.



Si se comparan los resultados de ambos estudios para el mismo escenario en 2050, el retroceso de la línea de orilla es mucho mayor cuando se tiene en cuenta la subsidencia. Por tanto, debería considerarse dicho factor a la hora de planificar las medidas de adaptación a los efectos del cambio climático.

5.2.3 Estudios específicos sobre el efecto de la subida del nivel del mar en el riesgo de inundación

Las inundaciones son otro de los efectos más importantes recogido en los estudios de posibles impactos del cambio climático en la costa del Delta del Ebro (LIM-UB, 1999-2000; GENCAT, 2008; y LIM, 2011).

Las primeras menciones a dichos efectos se encuentran en el estudio LIM-UB (1999-2000), (apartado 2.2.1). En él se recogen resultados de otros estudios realizados por miembros del grupo de investigación en torno al efecto de la subida del nivel del mar sobre el riesgo de inundación en la zona del Delta (Figura 2.4), y se tiene en cuenta que para una subida relativa del nivel medio del mar de alrededor de 0,50 m, con subsidencia local, el periodo de retorno de la inundación pasaría de 50 a 5 años (Figura 2.3).

Siguiendo la línea del análisis presentado en el estudio anterior, un informe más reciente del mismo Laboratorio (LIM, 2011) considera aspectos tales como la interacción de la subsidencia en los terrenos del Delta con los efectos del cambio climático en la inundación costera. En dicho informe se toman los escenarios de la Figura 2.82 y, mediante combinación de Modelos Digitales del Terreno con Sistemas de Información Geográfica, se estudia la inundación, incluyendo además distintas situaciones de operación de los canales de riego en el hemidelta Norte (Figura 2.83). Se puede resaltar la capacidad de regulación a través del uso de los canales sobre la extensión de superficie afectada por la inundación en función de la subida relativa del nivel del mar, con un máximo de reducción para un aumento de 0,40 m. Los escenarios de subida relativa del nivel del mar, que incluye la subsidencia, se interpretan como niveles de probabilidad y en base a dicha idea se presentan los niveles de riesgo de inundación en cada zona (Figura 2.84).

La magnitud de la extensión afectada por la inundación se analiza en estudios como el llevado a cabo por el Taller de Ingeniería Ambiental (Taller de Ingeniería Ambiental, 2007), apartado 2.1.2. En él se indican la pérdida de hasta un 50% de la llanura deltaica con un ascenso mínimo del nivel del mar previsto para 2050 de 25 cm. Otro estudio que ofrece mapas de extensión de la inundación bajo distintos escenarios de cambio climático para los años 2050 y 2100 es el informe de la Generalitat de Catalunya (GENCAT, 2008), apartado 2.1.3. Los autores aplican un modelo de inundación en la zona de costa de las bahías interiores considerando solo el aumento del nivel del mar (escenarios de subida de 0,15 m en 2050 y de 0,4 m y 1 m en 2100) y una subsidencia media de 0,2 cm/año. Los resultados de retrocesos de línea de costa y zonas inundables se pueden observar en la Figura 1.54, Figura 1.55 y Figura 1.56. En ellas, se aprecia que la zona inundable para el aumento relativo del nivel del mar de 0,60 m (0,4 m +0,2 m de subsidencia) es bastante similar a la zona dada en la Figura 2.4 del estudio de LIM-UB (1999-2000).

Aunque el estudio anterior aplica el modelo de inundación a la zona de las bahías interiores, otro estudio realizado por la Universidad de Cantabria (IH-UC, 2009) evalúa la tendencia a largo plazo también del cuantil del 95% de la cota de inundación, encontrando una reducción que sólo es significativa de forma estadística en la zona interior de las bahías. En el mismo estudio, se analiza la inundación en las playas bajo los escenarios de subida del nivel del

mar considerando el ascenso vertical máximo para una playa de talud infinito y un número de veces al año que se da la inundación. Los resultados para la cota de inundación de 100 años de periodo de retorno en 2050 y 2100 se dan en la Figura 5.18

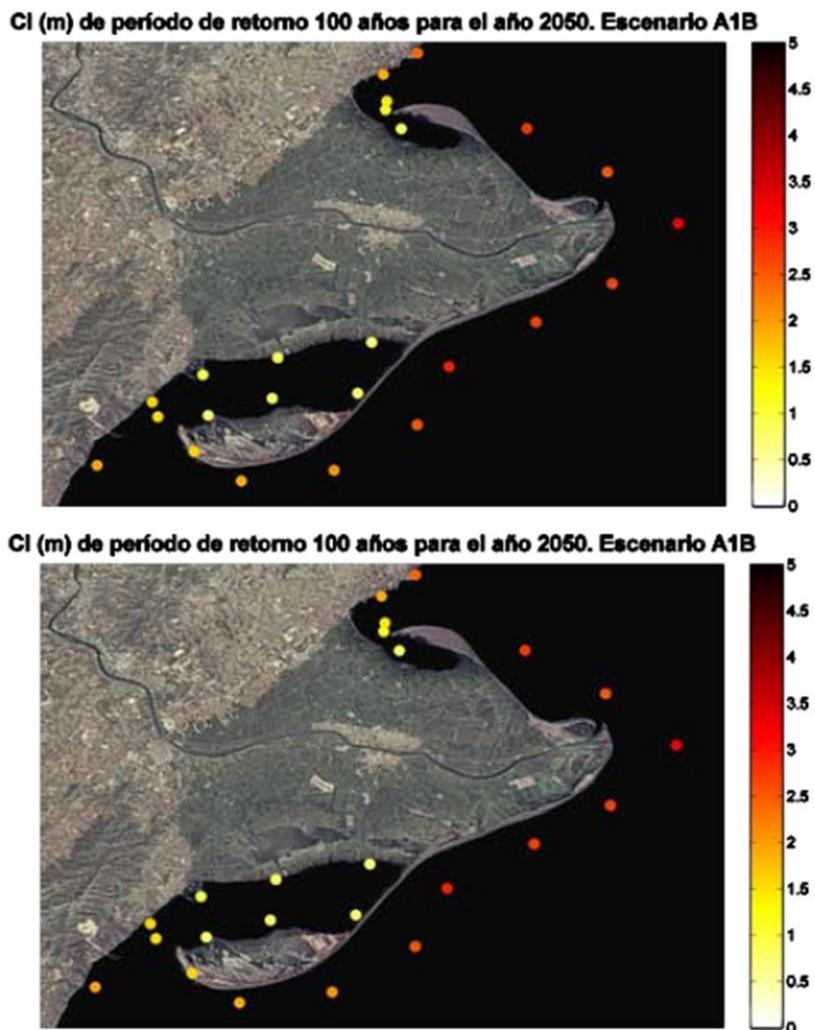


Figura 5.18: Cota de inundación de periodo de retorno de 100 años en 2050 y 2100 bajo el escenario A1B (Fuente: IH-UC, 2009)

El aporte sedimentario del río se considera también en estudios como el realizado por la Oficina Catalana de Cambio Climático (OCCC, 2017), apartado 2.1.8. A la hora de simular la inundación costera del Delta bajo diferentes escenarios de cambio climático contempla distintas hipótesis de llegada de sedimentos y los impactos que podría tener la propuesta del proyecto Life (Figura 1.108).

5.2.4 Estudios específicos sobre otros efectos asociados al cambio climático

Entre los efectos asociados al cambio climático se encuentra el impacto en la costa del Delta de los temporales, también llamados en algunos estudios tormentas, que podría causar daños de inundación y rotura de barras en las playas con más frecuencia que la actual (LIM, 2011), Figura 5.19, pasando de ser ocasionales o episódicas a frecuentes.



zona	proceso	escala	efecto
La Marquesa	retroceso l. de orilla	años-décadas	desaparición playa / exposición límite campos
	inundación	episódica (tormenta)	input agua y sedimento a campos de arroz
	inundación	largo plazo RSLR	inundación permanente zona
La Banya	retroceso l. de orilla	años-décadas	desaparición playa / exposición dique salinas
Illa de Buda	rotura/inundación	episódica (tormenta)	input agua y sedimento al lagoon
	inundación	largo plazo RSLR	inundación permanente zona
Trabucador	rotura/inundación	episódica (tormenta)	rotura conexión la Banya / afectación explotación salina
	retroceso l. de orilla		exposición tendido eléctrico
Costa Bahías / plana deltaica	inundación	largo plazo RSLR	inundación permanente zona

Figura 5.19: Zonas y variables que definen y determinan los problemas costeros en el Delta del Ebro (Fuente: LIM, 2011)

En estudios más recientes, como el de Sayol y Marcos (2019), se aplica una metodología que asocia los temporales (tormentas) en la costa y el oleaje junto con la subida del nivel del mar para predecir los efectos del cambio climático en el Delta del Ebro. Se usan proyecciones locales de variación del nivel del mar derivadas de conjuntos de modelos regionalizados y las proyecciones sobre el Mediterráneo para los temporales de los efectos del cambio climático y vientos que caracterizan los eventos extremos. Se considera también el movimiento vertical eustático de la tierra en el cálculo del nivel total relativo del mar, junto con el run-up del oleaje. Los autores propagan ambas condiciones superpuestas sobre un modelo digital del terreno para obtener los mapas de inundación en 2050 y 2100 con dos escenarios de cambio climático (RCP4.5 y RCP8.5).

Los oleajes más energéticos, normalmente, coinciden con temporales y grandes mareas meteorológicas. Tienen en cuenta que existe una correlación entre la marea meteorológica y la altura de ola significativa, dicha correlación les permite obtener el periodo de retorno conjunto de la marea meteorológica y la altura significativa, lo que resulta en una reducción del periodo de retorno si no se considerase dicha interacción. (Figura 5.20).

Los resultados obtenidos para los mapas de riesgo de inundación en ambos escenarios para 2050 y 2100 sin y con consideración de la variabilidad estacional e interanual, se pueden ver en las Figuras 5.21 y 5.22.

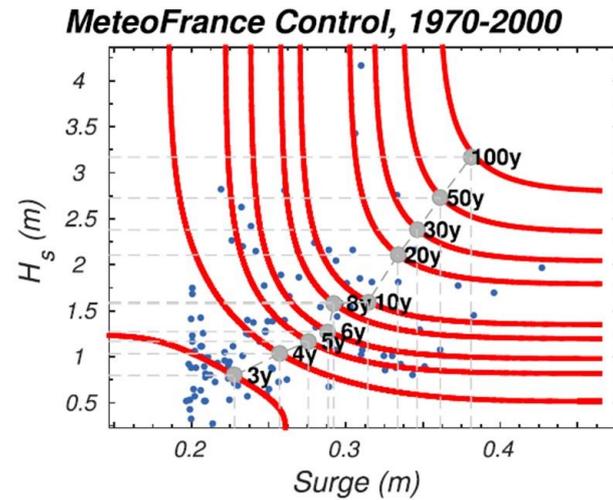


Figura5.20: Contornos de probabilidad conjunta de marea meteorológica y altura de ola significativa. (Fuente: Sayol y Marcos, 2019)

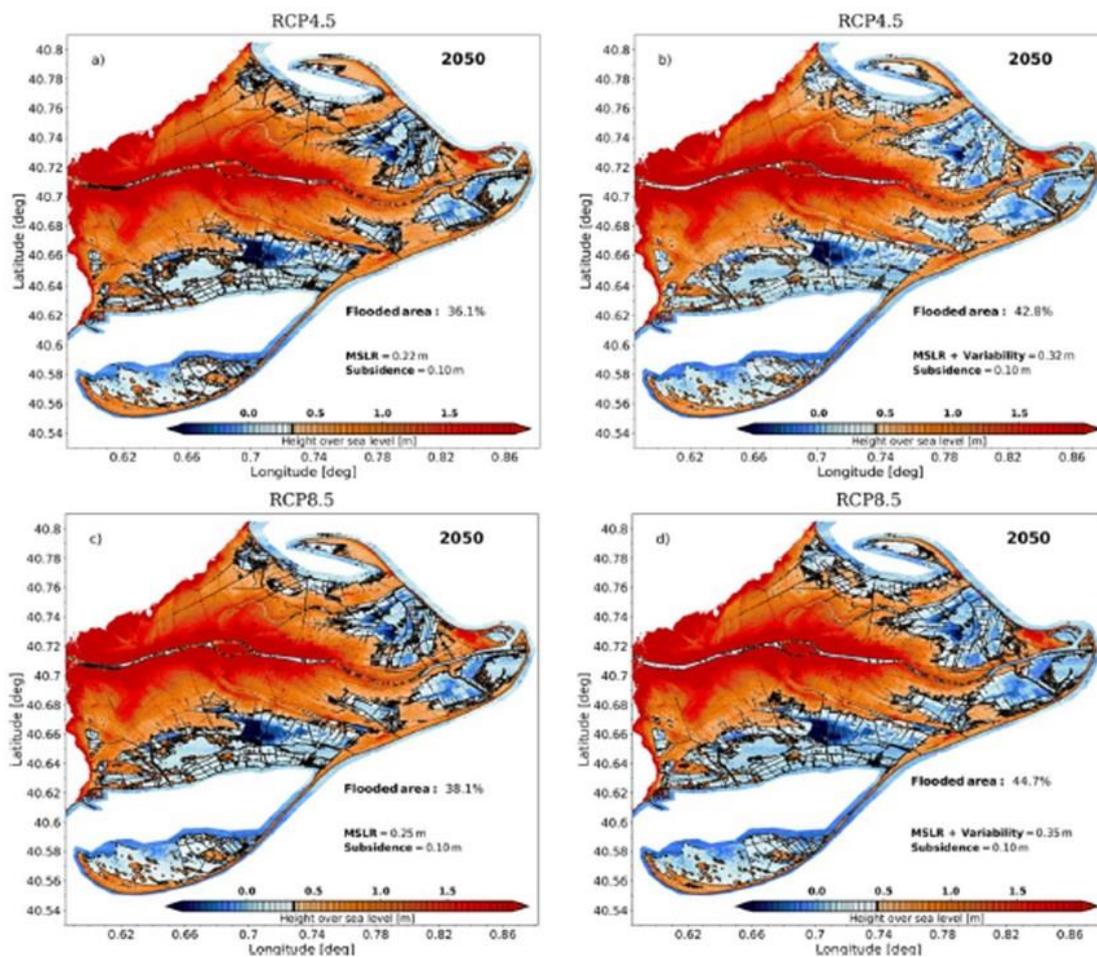


Figura5.21: Riesgo de inundación para 2050 para RCP4.5 (arriba) y RCP8.5 (Abajo), sin y con consideración de la incertidumbre asociada a variabilidad estacional e interanual (izda. y dcha. respectivamente) (Fuente: Sayol y Marcos, 2019)

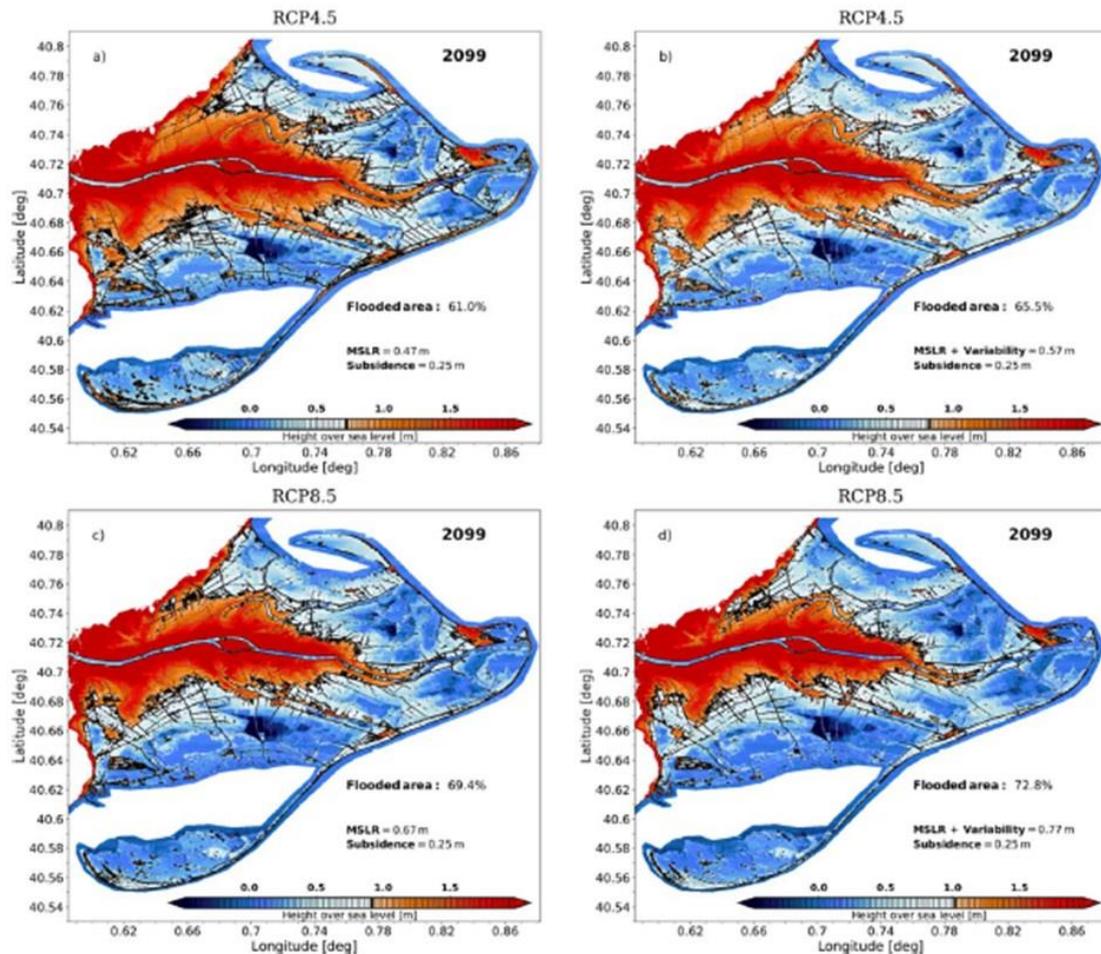


Figura 5.22: Riesgo de inundación para 2099 para RCP4.5 (arriba) y RCP8.5 (Abajo), sin y con consideración de la incertidumbre asociada a variabilidad estacional e interanual (izda. y dcha. respectivamente) (Fuente: Sayol y Marcos, 2019)

A modo de ilustración: una subida relativa del nivel del mar de 0,5m, similar a la dada para el año 2050 bajo el escenario RCP8.5 el área inundada considerada es de aproximadamente el 45%. Por otro lado, los autores destacan que los eventos extremos podrían contribuir alrededor de un 20% para los casos RCP4.5 y RCP8.5 en 2050 y 2099, con respecto a considerar solo la subida del nivel del mar, y concluyen que el efecto conjunto de las condiciones marinas extremas debe considerarse para no infravalorar el riesgo asociado.

Por último, cabe destacar el estudio de Grases, Gracia, García-León, Lin-Ye, y Sierra (Grases et al., 2020), que se enfoca hacia la interacción entre el oleaje en temporal y la morfología de las playas; tomando como caso de estudio una de las playas en el Delta del Ebro. Se lleva a cabo un análisis de la erosión y la inundación en las condiciones actuales y bajo escenarios futuros en la playa de Riumar, a través de propagaciones del oleaje que se usan como condiciones de contorno para simulaciones hidro-morfodinámicas. La playa de Riumar (Figura 5.23), como indican, se caracteriza por cambios de orientación en la línea de costa, influencia de la desembocadura, gradientes acusados desde la zona emergida hasta la profundidad de cierre, existencia de terrenos a altura menor de 1 m en la zona

interior y cambios importantes en el fondo marino por la acción conjunta del oleaje y los sedimentos finos.

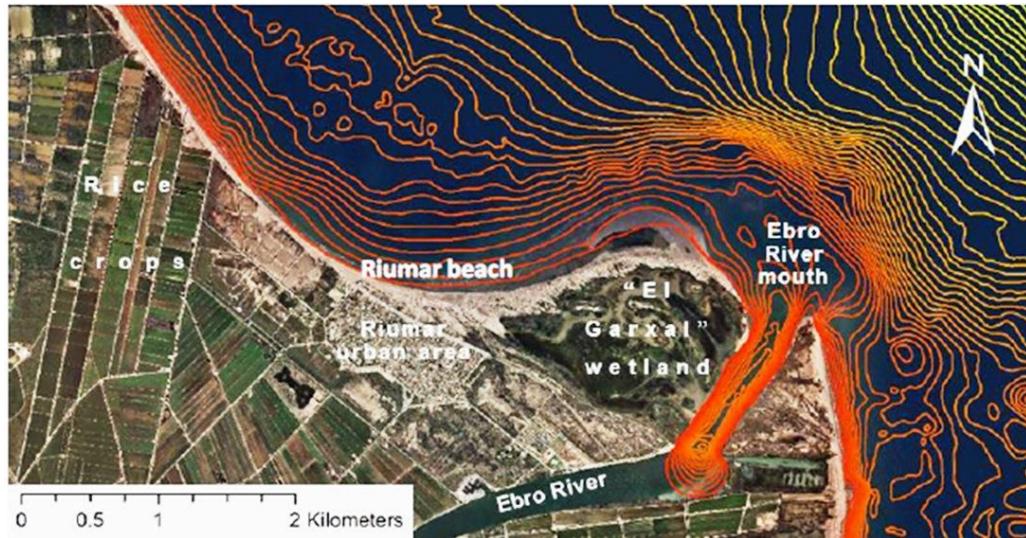


Figura 5.23: Playa de Riumar y batimetría (Foto: ICGC; Fuente: Grases et al., 2020)

Una de las ideas principales que señala el estudio es que el aumento del nivel del mar y las tendencias del oleaje en el futuro provocarían variaciones no lineales del área inundada y el sedimento movilizado en temporal; y el nivel de inundación y transporte transversal de sedimentos podrían aumentar. En línea con lo anterior, se indica la necesidad de desarrollar planes adaptativos que puedan funcionar bajo distintos escenarios futuros y acomodarse a los imprevistos y, para ello, hay que identificar los puntos de inflexión en los que modificar la gestión actual para poder manejar los riesgos.

Consideran 6 escenarios que cubran condiciones de oleaje y subida de nivel del mar; tanto actuales como futuras (escenario RCP8.5 del Informe Quinto del IPCC), así como las tres direcciones más importantes en cuanto a altura de oleaje para cada una de ellas y con periodos de retorno de 5 y 100 años para cada dirección (Figura 5.24), con o sin marea meteorológica. Los autores consideran la marea meteorológica invariable; ya que indican que su sensibilidad al cambio climático en el Mediterráneo es baja de acuerdo con el estudio de Conte y Lionello (2013). Además, consideran los valores del intervalo de confianza del 90% asociado al escenario RCP 8.5 en los horizontes del 2050 y 2100 de subida del nivel de mar prevista.

Escenario	Clima de oleaje				Nivel del mar (m)		
	Oleaje	Dirección	T_R (años)	M.M. (m)	SLR	Subsidencia	Total
1	Actual	NE, ENE, E	5, 100	0	0	0	0
2				0.35	0	0	0.35
3	RCP 8.5	NNE, NE, E	5, 100	0	0.26	0.10	0.36
4				0.35	0.26	0.10	0.71
5				0	0.78	0.25	1.03
6				0.35	0.78	0.25	1.38

Figura 5.24: Condiciones de simulación para cada escenario considerado en el estudio de Grases et al. (2020)

Tras la propagación del oleaje de zona profunda a intermedia, refinan los resultados cerca del área de estudio y aplican un modelo 2D hidrodinámico para evaluar la circulación cercana a la costa y los flujos de sedimentos. También calculan el área inundada, teniendo en cuenta la contribución relativa del aumento del nivel del mar y el oleaje, y se cuantifica la distribución espacial de la erosión y acumulación de sedimento.

Los resultados para la inundación en escenarios futuros bajo una determinada dirección del temporal, de periodo de retorno 100 años, pueden verse en las Figuras 5.25 y 5.26, donde las imágenes a la izquierda son de antes del temporal y los de la derecha son con posterioridad. En las figuras de arriba no se ha considerado la marea meteorológica mientras que la de abajo sí se toma en cuenta. Un resumen de los resultados para todas las simulaciones de climas futuros se puede ver en la Figura 5.27.

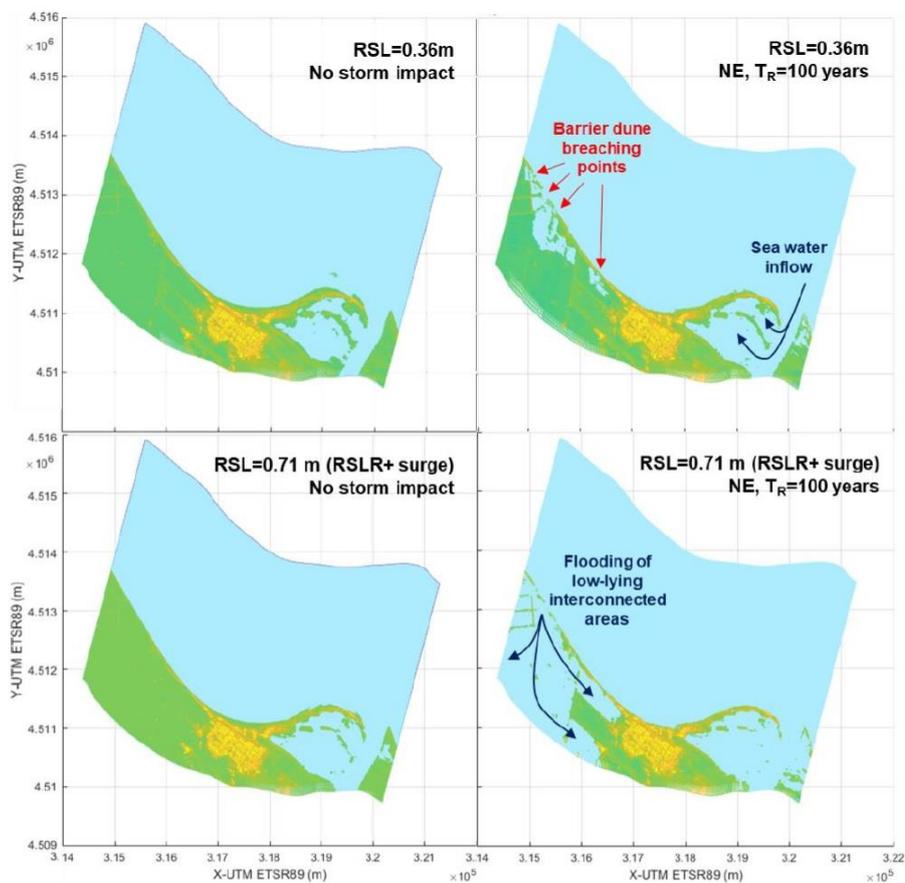


Figura 5.25: Mapa de inundación con tormenta NE de periodo de retorno 100 años en 2050 (Fuente: Grases, et al, 2020)

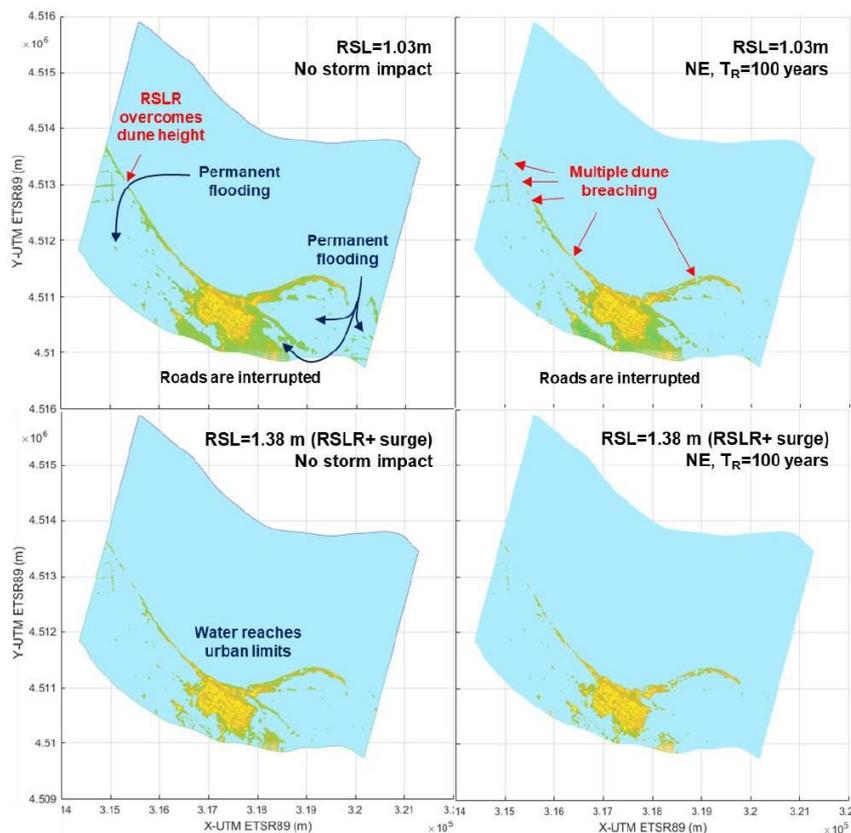


Figura 5.26: Mapa de inundación con tormenta NE de periodo de retorno 100 años en 2100 (Fuente: Grases et al., 2020)

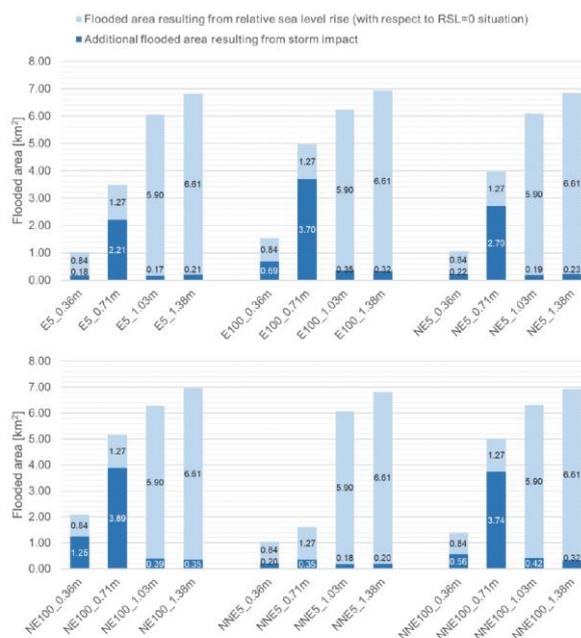


Figura 5.27: Áreas inundadas respecto a la situación sin inundación en los climas futuros para cada combinación de dirección de tormenta, periodo de retorno y nivel del mar (Fuente: Grases et al., 2020)



En la Figura 5.28 se puede observar la relación entre la subida del nivel del mar y la respuesta en cuanto a área inundada para cada caso de simulación; tanto en condiciones actuales (CC) como en futuras (FC)

Para niveles de aumento bajo del nivel del mar, menor de 0,4 m (que coincide con el límite para el que la reducción de inundación por cerrar canales era máximo en el estudio del LIM, 2011) las defensas costeras naturales son capaces de hacer frente al impacto del oleaje salvo en los casos de temporales muy energéticos. Con valores moderados (entre 0,4 y 0,7 m) los temporales, incluso menos energéticos, pueden romper la barrera de dunas. Mientras que para valores elevados (mayores de 0,7m) la inundación se deriva de la subida estacionaria del nivel relativo del mar y las defensas costeras naturales se sobrepasan en varios puntos. Por tanto, sería importante considerar el impacto del oleaje en las inundaciones a través de modelos numéricos para niveles de subida del mar menores de 0,7m.

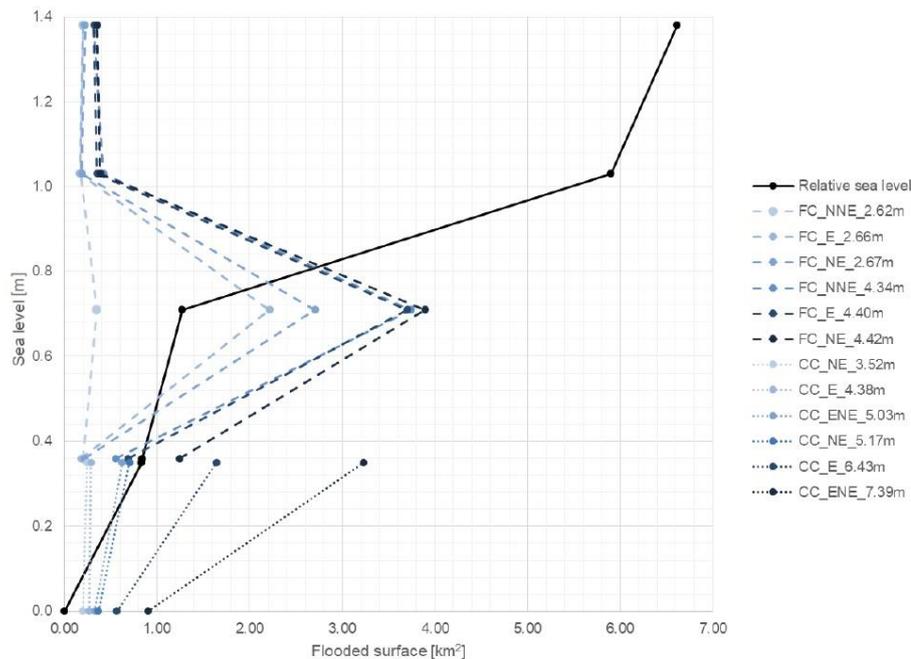


Figura 5.28: Nivel del mar y área inundada para cada simulación (Fuente: Grases et al., 2020)

Basándose en lo anterior, los autores identifican como puntos de inflexión los niveles de aumento del nivel del mar de 0,4 m y 0,7 m para definir alternativas de adaptación a largo plazo.

5.3 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Este apartado está dedicado a presentar las diferentes técnicas que se han utilizado para determinar de manera aproximada, las transformaciones que puede producirse en la costa debido a la subida del nivel de mar provocada por el cambio climático en las diferentes playas que conforman la costa del Delta del Ebro.

5.3.1 Fases del análisis

La metodología seguida para analizar los principales efectos del Cambio Climático en la zona de estudio se resume en cuatro escalones que se muestran en la Figura 5.29.



Figura 5.29: Esquema metodológico seguido para el análisis del efecto del Cambio Climático en la costa del Delta del Ebro

5.3.1.1 Factor climático

El principal factor de cambio climático contemplado en este Plan es la subida del nivel del mar; no considerando las variaciones en otros factores climáticos como temperatura, oleaje etc. Esto es debido, en primer lugar, a la falta de consenso en la comunidad científica sobre los cambios de frecuencia, dirección o intensidad de los temporales de oleaje (IPCC, 2014). Como se ha recogido anteriormente en el apartado 5.2.1 (Proyección de variables climáticas marinas en el Delta del Ebro), las proyecciones de las demás variables de clima marítimo, no parecen presentar cambios tan relevantes e incluso en algunos casos poseen una gran incertidumbre. Además, los métodos que se han empleado para estimar los efectos del cambio climático tienen por objeto obtener un resultado en ausencia de medidas de adaptación, realista, coherente y con suficiente resolución en todo el litoral analizado; por lo que no se considera necesario un excesivo nivel de detalle en la simulación de los procesos estudiados.

La subida del nivel del mar, se ha supuesto en dos de los escenarios propuestos en el 5º Informe del IPCC (IPCC, 2014). En concreto, se ha considerado un escenario de emisiones altas, RCP8.5, y otro de emisiones medias, RCP4.5 y los valores tomados de ellos de la gráfica de previsión de subida (Figura 5.2) son los extremos superiores de la banda de confianza. El año de referencia del nivel del mar que se ha tomado es el actual (2020) que tenía una previsión de subida (Figura 5.2) por lo que este valor hay que restarlo a las



previsiones de subida del año horizonte de 2100 y los años intermedios considerados 2040, 2060 y 2080, cuyo resultado se muestra en la Tabla 5.9.

Escenario/año	2040	2060	2080	2100
RCP8.5	0,13	0,31	0,56	0,87
RCP4.5	0,09	0,23	0,43	0,70

5.3.1.2 Impactos

A continuación se analizan los potenciales impactos que pueden producirse en las costas del Delta del Ebro debido a los efectos provocados por el cambio climático y que se resumían en la Figura 5.29. Estos impactos son, en primer lugar, los causados por la reducción en la diferencia de cota entre la tierra y el mar, que viene gobernada por dos factores (Figura 5.30): la subida del nivel del mar (RSL) y la subsidencia de la plataforma deltaica (S); ello hace que el resguardo se vea reducido en $S+RSL$, y por tanto aumente la capacidad que tiene el mar de inundar la plataforma costera. Así, el resguardo, R , se vería reducido a R_{cc} según el escenario y con una subsidencia que podría tomarse con una tasa de 0,35 cm/año (Sánchez-Arcilla et al., 1993), dando un valor que se muestra en la Tabla 5.10, para cada uno de los escenarios y años considerados.

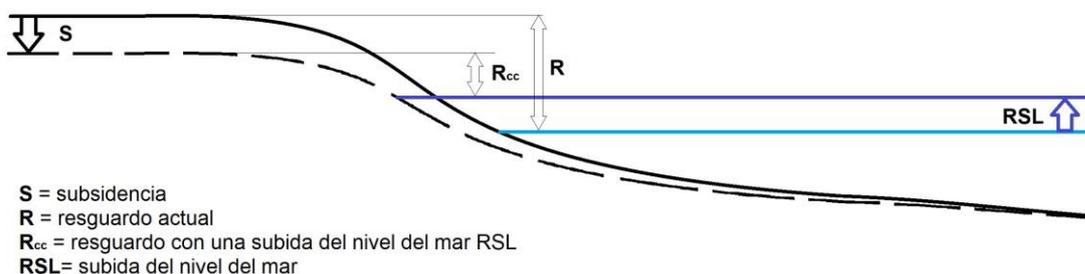


Figura 5.30: Cotas relativas entre tierra y mar y su efecto con el cambio climático

Escenario/año	2040	2060	2080	2100
RCP8.5	0,20	0,45	0,77	1,15
RCP4.5	0,16	0,37	0,64	0,98

En segundo lugar se ha considerado el impacto producido por la erosión costera, que tendrá una mayor penetración en caso de producirse cambios en la intensidad del oleaje.

En resumen, se considera que los siguientes impactos afectarán a la costa estudiada:

- Inundaciones permanentes: se ha estimado teniendo en cuenta únicamente el nivel topográfico, y afectando a toda la costa. Las consecuencias de dicho impacto son apreciables ya que la pendiente es muy pequeña.
- Erosión costera: a pesar de que depende de los niveles extremos del mar, el oleaje y el viento, solo se considerará la erosión debida a la subida del nivel del mar.

5.3.1.3 Clasificación o tipo de costa

La costa del Delta del Ebro se puede clasificar en tres tipos en función de su rigidez:

- Costa flexible: es un tipo de costa moldeable por el oleaje y en la que el mayor riesgo lo constituye la erosión costera, que se ha estimado mediante “regla de Bruun”, si bien en algunos tramos puede emplearse la formulación de Dean y Maurmeyer (1983).
- Costa rígida: este tipo de costas puede ser natural (acantilados, costas rocosas) o artificial (paseos marítimos, obras de defensa, puertos, etc.). Se caracteriza porque no es moldeable por el oleaje y los principales impactos que pueden producirse en ella dependen del tipo de costa, siendo algunos ejemplos el aumento del volumen de rebase (inundación temporal producto de los temporales de oleaje) o la socavación en los muros, que puede producir el descalce de los mismos.
- Costa semirígida: es un estado de transición entre la costa flexible y la rígida. Los impactos producidos por el aumento del nivel del mar son la erosión costera, así como otros como la posible socavación de los muros y el rebase. De forma aproximada se puede considerar que una playa pasa de ser flexible a semirígida cuando la anchura de playa con el mar en calma es menor o igual a 10 m (Figura 5.31).

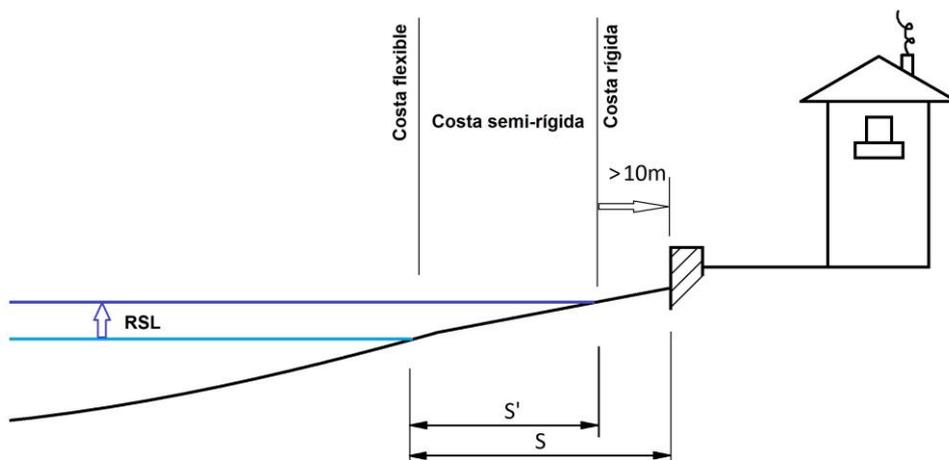


Figura 5.31: Definición de costa semirígida

De cara a estimar los posibles impactos de la subida del nivel del mar en la costa, cuando esta es flexible se pueden aplicar una serie de teorías que predicen, aproximadamente su comportamiento, siendo la de uso más corriente la llamada “Regla de Bruun” (Bruun, 1962),



CEDEX

que se describe en el apartado siguiente. Cuando la estructura flexible es alargada y tiene agua tanto en el frente como en el trasdós (flechas o cordones litorales), entonces se puede aplicar el método de Dean y Maurmeyer (1983). Por el contrario, cuando las costas son rígidas las transformaciones naturales son mucho más lentas o no obedecen a reglas simples, por lo que no son de aplicación las reglas y métodos anteriormente indicados.

En resumen, los tipos de costa y que se pueden hallar en el litoral son tres:

1. Costa flexible: de aplicación la “regla de Bruun” o Dean y Maurmeyer (1983).
2. Costa semirígida: se puede aplicar la “regla de Bruun” solo hasta que la anchura de playa es inferior a un umbral que, para este caso, se ha considerado de 10 m.
3. Costa rígida: No es moldeable por el oleaje y resistirá los embates del mar hasta un cierto momento que se descalce por socavación o sea rebasable.

En el caso del Delta del Ebro, la costa se caracteriza por ser mayoritariamente flexible, por lo que el mayor riesgo lo constituye la erosión costera, que se ha estimado mediante “regla de Bruun” (Bruun, 1962) y la aplicación de la fórmula de Dean y Maurmeyer (1983).

En los tramos de costa semi-rígida, a medida que se reduce la anchura de la playa, por efectos del cambio climático, cambia su comportamiento, de costa flexible a costa rígida, con modos de fallo distintos y por tanto distintos impactos. Al tratarse de un estado de “transición” respecto a la subida del nivel del mar, es difícil estimar los efectos que se pueden producir sobre ella, como son la erosión, los rebases y socavaciones. En este sentido, los modelos numéricos y formulaciones existentes en la actualidad son más apropiados para aplicarse a costas estrictamente rígidas.

5.3.1.4 Efectos en la costa

Si no se realiza ninguna acción, los efectos esperables en la costa del Delta del Ebro debidos a la subida del nivel medio del mar (RSL) son básicamente asociados con la inundación y penetración del mar sobre la plataforma costera; afectando tanto a zonas húmedas como a tierras llanas. Es de especial interés la barra del Trabucador y el cordón litoral de Illa de Buda, respecto al movimiento que pueda producir en ellos y la posibilidad de rotura o desaparición parcial.

Estos efectos se estudian y analizan en apartados siguientes aplicando las técnicas expuestas en el apartado anterior (“regla de Bruun” (Bruun, 1962) y la aplicación de la fórmula de Dean y Maurmeyer (1983)) de cuyo desarrollo teórico se ocupa el apartado siguiente.

5.3.2 Respuesta de la costa flexible a la subida del nivel del mar

Ante la subida del nivel del mar, existen diversos modelos que nos aproximan a conocer cómo va ser la respuesta de la línea de costa y el perfil de playa (Bruun, 1962; Dean, 1987; Kriebel y Dean, 1993). Estos modelos consideran que únicamente es el transporte transversal de sedimentos el causante de la respuesta del perfil de playa al cambio del nivel del mar; aunque todos ellos son compatibles con un movimiento longitudinal de sedimentos, si bien podría causar cambios en la posición de la línea de costa (Dean 1991).

Las costas del Delta del Ebro, por su propia estructura morfológica, son de aplicación tanto la Regla de Bruun (Bruun, 1962), como para playas barrera el método de Dean y Maurmeyer (1983).

5.3.2.1 La Regla de Bruun y su aplicación a playas barrera

Uno de los grandes temas de interés de los ingenieros costeros consiste en analizar la relación entre un aumento de nivel del mar y la respuesta del perfil de la playa. Bruun (1962) presentó una relación entre la subida del nivel del mar y la recesión en la línea de costa. Este trabajo hoy en día ha sido matizado y ampliado, aunque durante décadas se ha considerado un referente importante en la ingeniería de costas, y de hecho todavía hoy se emplea de manera habitual para dar una idea de las consecuencias en playas de la subida del nivel del mar.

Para estimar la erosión a largo término en las playas de Florida, Bruun (1962) supuso que la erosión era debida a la subida del nivel del mar respecto a la tierra. El método de Bruun (Figura 5.32) asume que, si se produce una subida del nivel del mar, el perfil se mueve verticalmente hacia arriba, sin cambiar su forma, ya que no requiere una forma específica de equilibrio. Asimismo, si se considera que la costa está en equilibrio sedimentario, entonces la elevación del perfil debe producirse sin necesidad de aportar arena al sistema. Para ello, esta elevación debe producirse a costa de una erosión ΔX , de manera que el volumen que queda por encima del viejo perfil es idéntico al que queda por debajo.

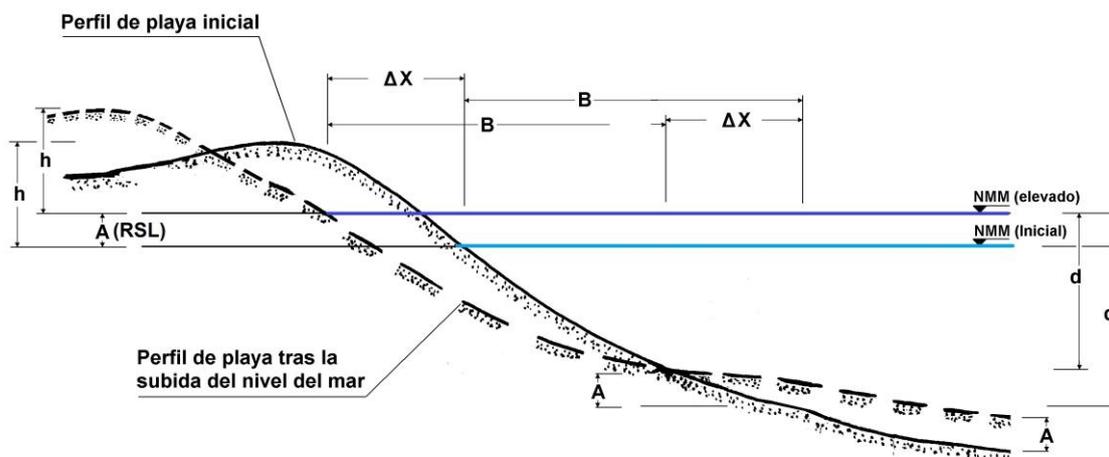


Figura 5.32. Variables empleadas en la regla de Bruun (Bruun, 1962)

Al producirse una subida del nivel del mar, A , el volumen de material por unidad de longitud necesario para reestablecer la elevación del fondo sobre una longitud del perfil B , sería el producto $A \cdot B$, siendo B la longitud sumergida del perfil, es decir, la distancia desde la línea de costa hasta la profundidad de cierre, d , a partir de la cual no hay movimiento significativo de sedimento.

El volumen de arena por unidad de longitud, $A \cdot B$, se obtiene por la erosión del perfil. Así, el retroceso de la orilla ΔX se determina por un balance sedimentario entre el volumen $A \cdot B$, con el área entre los dos perfiles. Este área está dada por $\Delta X(h + d)$ y representa la cantidad



de arena necesaria para restablecer el perfil original, siendo h la altura de la berma. Igualando los dos volúmenes resulta:

$$\Delta X = A \cdot \frac{B}{h + d}$$

También se puede escribir la ecuación de la forma siguiente:

$$\Delta X = \frac{AB}{(h + d)} = \frac{A}{\tan \theta}$$

Siendo $\tan \theta$ la pendiente promedio sobre el perfil activo.

Esta ecuación requiere conocer la profundidad de cierre, d , que puede obtenerse mediante fórmulas como la de Hallermeier (1981) o el manual CUR (1987) y la distancia B , que puede determinarse a partir de medidas o suponiendo que la playa tiene un perfil de equilibrio concreto. En el caso más sencillo (perfil de Dean), sería necesario conocer también el clima de oleaje, dado por la altura H_{S12} y el tamaño de grano nominal, D_{50} .

En un caso más genérico, cuando se considera un perfil parabólico tipo Bruun-Dean de la forma:

$$y = C x^n$$

El retroceso de la costa ΔX ante una elevación A del nivel del mar, sería:

$$\Delta X = \frac{A \left(\frac{d}{C}\right)^{\frac{1}{n}}}{(h + d)}$$

A la regla de Bruun se le han hecho diferentes modificaciones y aplicaciones, como Dean (Dean, 1991) o Dean y Maurmeyer (1983), que presentaron una metodología para obtener el retroceso de costa en una playa barrera con una laguna litoral ante una subida del nivel del mar. En esta metodología, representada en la Figura 5.33, el retroceso de la costa ΔX ante una elevación del nivel del mar A viene dado por:

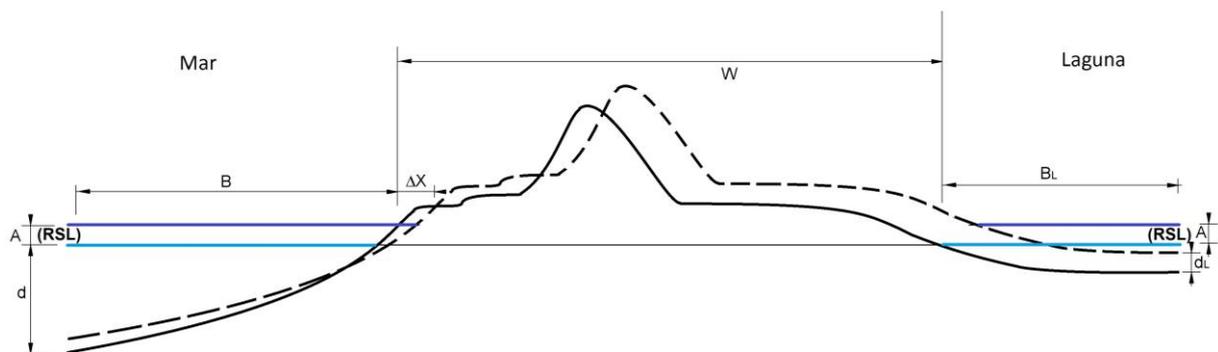


Figura 5.33: Aplicación de la Regla de Bruun para el caso de una playa barrera de una laguna litoral según Dean y Maurmeyer (1983)

$$\Delta X = A \frac{(B_L + W + B)}{(d + d_L)}$$



Dado que la regla de Bruun ya ha sido aplicada al estudio del efecto de la subida del nivel del mar por el cambio climático en estudios anteriores para la costa exterior del Delta, como se reseñaba en el apartado 5.2.2 (Estudios específicos sobre el efecto de la subida del nivel del mar en el perfil de playa), en este Plan se aplicará a una playa cuyo análisis no ha sido cubierto por dichos estudios. Se trata de la playa del Arenal, en el término municipal de L'Ampolla, que contiene un tramo urbano con cercanía de las viviendas al frente costero.

Por otro lado, se observa que en estudios previos se ha aplicado la regla de Bruun a las playas barrera de Trabucador y Eucaliptus. En este sentido, aquí se estima conveniente la aplicación de la formulación de Dean-Maurmeyer, que considera las características de la playa en el trasdós por la existencia de bahías y lagunas interiores y tiene en cuenta su influencia en los resultados.

5.3.2.2 Metodología aplicada al estudio de la erosión por la subida del nivel del mar en el Delta del Ebro

Para analizar el comportamiento de la costa se han empleado las siguientes formulaciones dependiendo de si se trata de una playa barrera o no:

- La fórmula de Dean-Maurmeyer, para playas barrera:

$$\Delta X = A \frac{(B_L + W + B)}{(d + d_L)}$$

- La regla de Bruun, dada por la siguiente expresión:

$$\Delta X = A \cdot \frac{B}{h + d}$$

La metodología seguida, se resume en los puntos siguientes:

- Se han realizado perfiles perpendiculares a la línea de orilla cada 50 m en cada tramo de costa considerado. En cada uno de estos perfiles se ha obtenido la posición de la orilla y del límite superior de la playa, en el tipo de playa urbana (paseo marítimo), y de la orilla exterior e interior, en el caso de las playas tipo barrera.
- La anchura de la playa seca se ha medido con los datos de línea de orilla de la batimetría del Instituto Hidrográfico de la Marina, de mayor actualidad (2019), en la orilla de la playa del Arenal y la barra del Trabucador, y se han usado las ortoimágenes de máxima actualidad del PNOA, que datan de 2018, en la línea del paseo marítimo de la playa del Arenal y la barra de Illa de Buda. Dicha anchura de playa seca corresponde a la distancia desde la línea de orilla hasta el primer elemento rígido (revestimientos del paseo marítimo) en la playa urbana y la distancia entre la orilla interior y exterior en las playas tipo barrera.
- En cada perfil de la playa urbana se ha aplicado la regla de Bruun y en las playas barrera se ha aplicado la fórmula de Dean-Maurmeyer, conocidos los valores del conjunto de variables que intervienen en las ecuaciones que se muestran más arriba, y que son:
 - Subida del nivel del mar, dos escenarios de emisiones (RCP4.5 y RCP8.5), RSL: Tabla 5.1



- Franja litoral, *B* y *BL*: batimetría del Instituto Hidrográfico de la Marina. Cabe señalar que en la laguna interior situada en el trasdós de la playa Illa de Buda los datos de batimetría no están disponibles, por lo que se ha estimado la franja litoral (*BL*) a partir de la media de dichos valores medidos en la playa del Trabucador, por considerarse de características similares en cuanto a granulometría y pendiente.
- Cota de la berma, *ZB*: ficha descriptiva de la playa del Arenal (CIIRC, 2010).
- Profundidad de cierre, *PdC* y *PdCL* : Tabla 5.3
 - *PdC*: en las zonas exteriores se han seguido los valores considerados por LIM, 2011, de 5,4 m para escalas de varios años y 9,5 m para escalas de varias décadas, calculados mediante la formulación de Birkemeier (1985) y contrastados con datos empíricos. En la playa del Arenal se ha tomado el valor de 5,4 m para todos los años debido a su situación más interna en la cercanía de la Punta del Fangar.
 - *PdCL*: en la bahía de los Alfaques, en la parte interna de la playa del Trabucador, se ha tomado el valor de 0,3 m, para la escala del corto-medio plazo, y se ha calculado su variación para la escala del largo plazo de acuerdo con el coeficiente a de valor 1,62 dado por el CEDEX (Peña y Antón, 2012), según la formulación de Hallermeier, para calcular la profundidad de cierre a largo termino en la zona Este de la Costa Española. Por tanto, se obtiene un valor de

$$D_c = 1,65 \times 0,3 = 0,5 \text{ m}$$

En la laguna interna de la Illa de Buda se han considerado los mismos valores, debido a la falta de datos al respecto, y la similar morfología en cuanto al tamaño de arena y pendiente suave en ambas zonas.

Playa	Profundidad de Cierre (m)	Año			
		2040	2060	2080	2100
Trabucador	<i>PdC</i>	5,4	5,4	9,5	9,5
	<i>PdCL</i>	0,3	0,3	0,5	0,5
Illa de Buda	<i>PdC</i>	5,4	5,4	9,5	9,5
	<i>PdCL</i>	0,3	0,3	0,5	0,5
El Arenal	<i>PdC</i>	5,4	5,4	5,4	5,4

- El retroceso de la línea de orilla se ha calculado para los años 2040, 2060, 2080 y 2100, siendo el año de referencia el 2020.

En las Figuras 5.34 a 5.37 se muestra un esquema de las zonas consideradas, playas de El Arenal, Illa de Buda y Trabucador, las variables y su uso para determinar la evolución en el tiempo de la costa flexible debido al cambio climático

Los resultados de la aplicación de la formulación de Dean-Maurmeyer y la Regla de Bruun, considerando los dos escenarios y fechas indicadas, se recogen en el apartado siguiente 5.3.2.



Figura 5.34: Zonas de estudio para determinar el retroceso de la costa exterior debido a la subida del nivel del mar, producida por el cambio climático (Foto: IGN)



Figura 5.35: Esquema de la zona en la playa de El Arenal y variables utilizadas para determinar el retroceso de la costa (Foto: IGN)

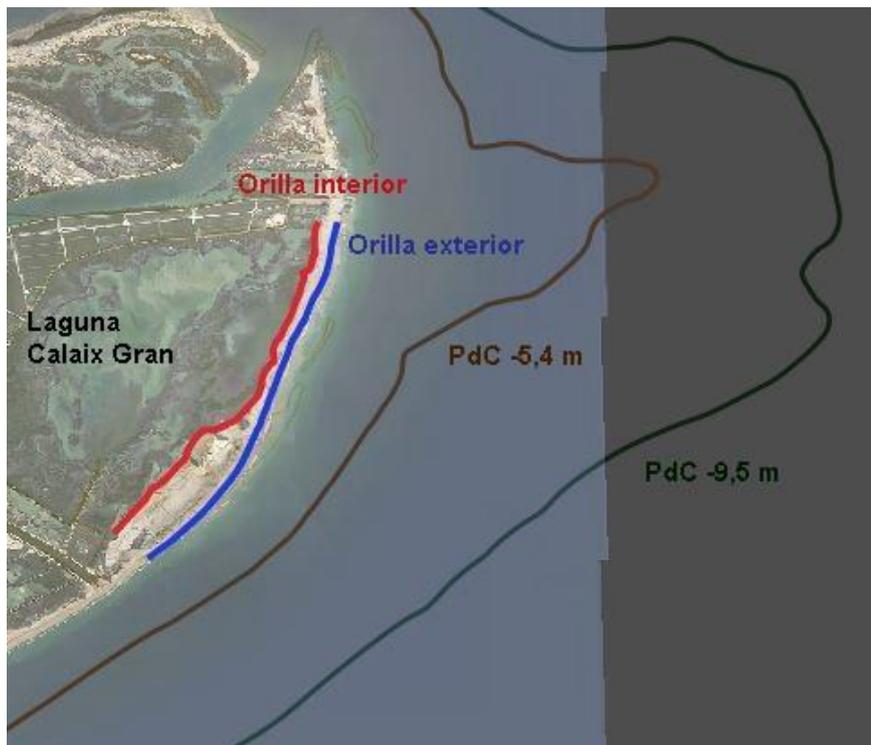


Figura 5.36: Esquema de la zona en la playa Illa de Buda y variables utilizadas para determinar el retroceso de la costa (Foto: IGN)

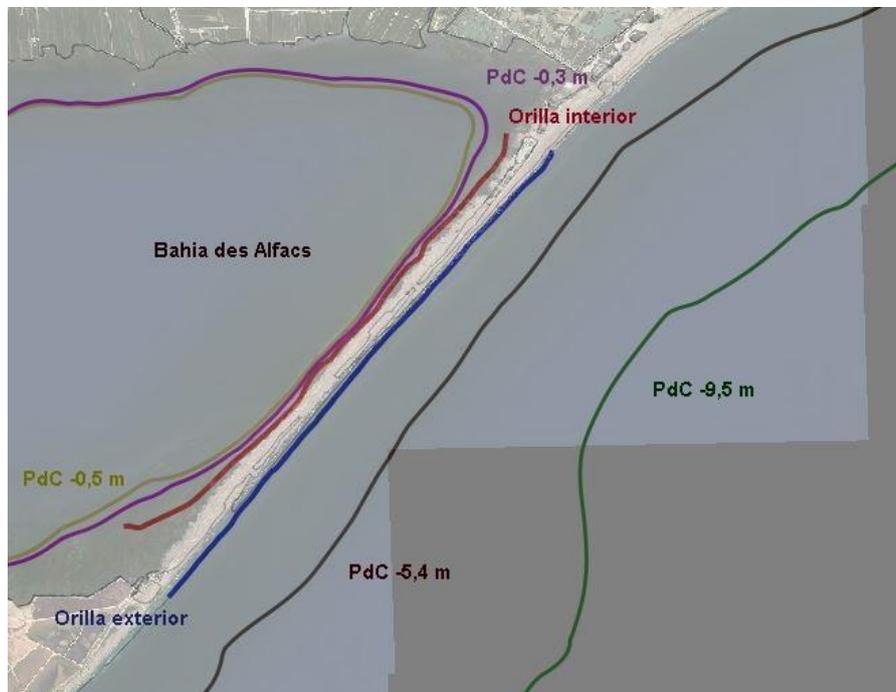


Figura 5.37: Esquema de la zona en la playa de El Trabucador y variables utilizadas para determinar el retroceso de la costa (Foto: IGN)

5.3.3 Efectos de la subida del nivel del mar sobre el Delta

En el apartado 5.2.2 (Estudios específicos sobre el efecto de la subida del nivel del mar en el perfil de playa) se presentaron los efectos de la subida del nivel del mar sobre los distintos tramos de la costa exterior del Delta del Ebro tratados por estudios previos. Aquí, se presentan resultados complementarios en aquellas zonas y con aquellas técnicas que no han sido cubiertas en aquellos estudios pero que se estima conveniente considerar.

Se han contemplado dos tipos de playas: Una playa abierta de carácter urbano situada en el extremo noroeste del Delta (playa del Arenal); y las dos playas de tipo barrera que se encuentran una al sur del Cabo Tortosa, Illa de Buda, y la otra al sur la barra del Trabucador que forma la barrera de la bahía de los Alfaques, (Figura 5.34).

5.3.3.1 Efectos en la playa urbana de El Arenal

El efecto que se prevé que se producirá en la playa del Arenal debido a la subida del nivel del mar provocada por el cambio climático se ha determinado aplicando la Regla de Bruun; aplicando los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para los años 2040, 2060, 2080 y 2100, se resume en las Figuras 5.38 y 5.39; que representan la previsión del retroceso de la costa en ausencia de medidas de adaptación, como recomienda la “Estrategia de Adaptación al Cambio Climático”.

Las figuras siguientes representan las anchuras (en metros) de cada tramo de costa en la actualidad (medidas de la ortoimagen de 2018 del PNOA) y el retroceso estimado de la línea de orilla. Los resultados se representan para las distintas fechas y escenarios de emisiones considerado.

ESCENARIO DE EMISIONES RCP4.5

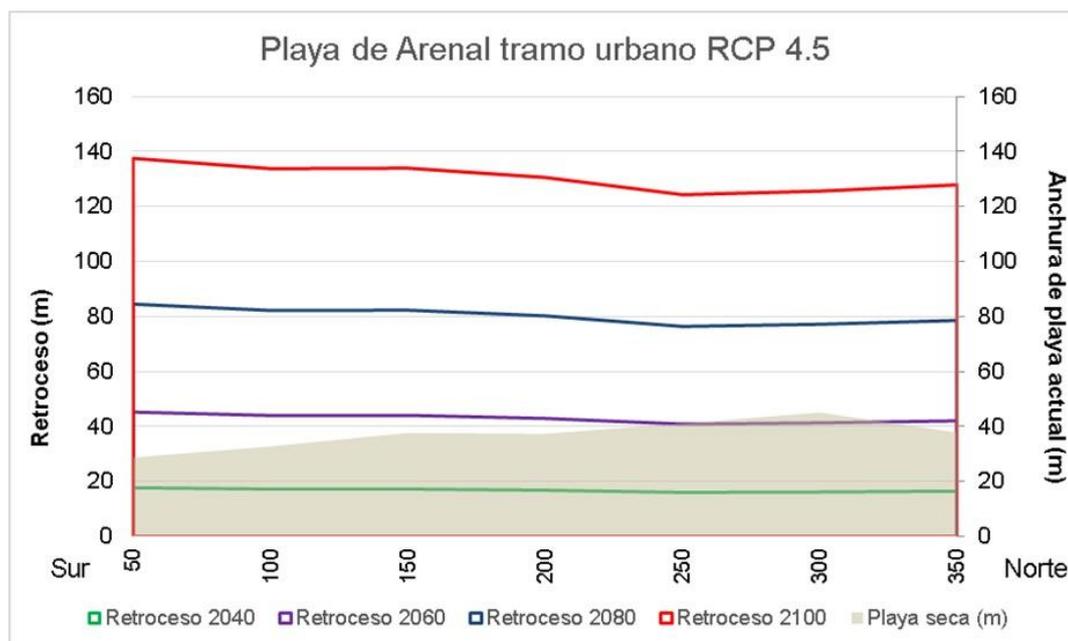


Figura 5.38: Playa de Arenal: Anchura de playa (sombreado) y retroceso estimado en metros (curvas correspondientes a 2040, 2060, 2080 y 2100) para el escenario RCP4.5



CEDEX

Año 2040: El retroceso se producirá de forma generalizada y homogénea a lo largo de la playa. El retroceso máximo se situaría en torno a 18 m, situado en el extremo sur.

Año 2060: La anchura de playa seca, que en la actualidad está entre los 29 y los 45 m, se vería muy mermada. Para este año ya se observaría la pérdida casi total de la anchura de playa seca, salvo algunos pequeños tramos hacia el extremo norte; siendo el máximo retroceso de 45 m aproximadamente, en el extremo sur.

Año 2080: Para esta situación se observan retrocesos en el rango entre los 76 y los 85 m, siendo igualmente mayor el retroceso en la zona sur. Aunque en este periodo no existiría playa en ausencia de otras medidas, estas distancias supondrían la anegación del paseo marítimo, la carretera posterior y posiblemente el alcance del camping colindante.

Año 2100: El retroceso para este horizonte y escenario de emisiones se estima en valores entre los 124 y 138 m, muy superiores a la anchura de playa actual.

ESCENARIO DE EMISIONES RCP8.5

El comportamiento en este escenario de emisiones es muy similar al anterior pero, como cabe esperar, los retrocesos son aún más significativos, acelerándose el proceso de pérdida de la playa seca y daños a las zonas posteriores.

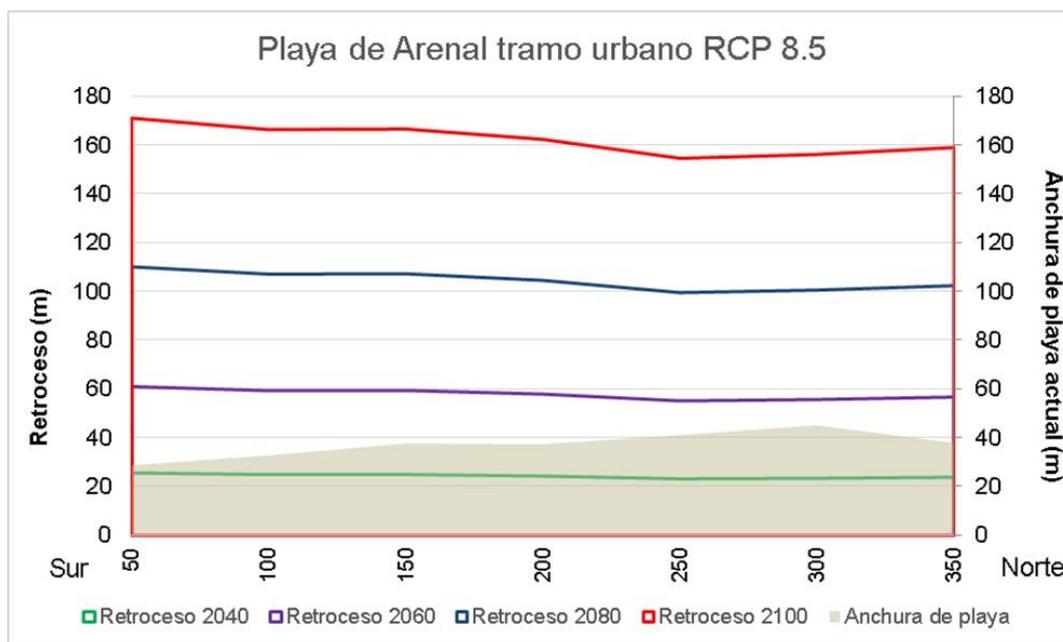


Figura 5.39: Playa de Arenal: Anchura de playa (sombreado) y retroceso estimado en metros (curvas correspondientes a 2040, 2060, 2080 y 2100) para el escenario RCP8.5

Año 2040: Se iría transformando la tipología de un tramo en la zona sur de flexible a semirrígido, ya que la anchura seca de playa quedaría por debajo de los 10 m. Podrían comenzar daños en paseo marítimo y rebases sobre él.

Año 2060: Desaparece toda la playa. Los retrocesos se encuentran entre los 55-60 m, con lo que se anegaría el paseo marítimo y la carretera posterior. La costa se comportaría

como rígida con daños importantes en los paseos marítimos y aumento de rebases e inundaciones en el trasdós.

Año 2080: El retroceso se encuentra en el rango entre los 100-110 m, con un aumento muy considerable respecto al anterior escenario. Los embates del mar harían inviable el paseo marítimo tal y como se encuentra en la actualidad siendo altamente vulnerable el trasdós a inundaciones por rebasas y alcance del mar. La costa se comportará como rígida con colapsos en sus estructuras e invasión del mar del trasdós.

Año 2100: Se alcanzarían valores del orden de 171-155 m, con los problemas asociados de inundación de grandes áreas en la zona e incrementando la vulnerabilidad y problemas indicados en los puntos anteriores.

5.3.3.2 Efectos en las playas tipo barrera

De igual forma se presentan los resultados de la aplicación de la fórmula de Dean-Maurmeyer a las playas tipo barrera para cada escenario de emisiones y cada horizonte temporal.

PLAYA ILLA DE BUDA - ESCENARIO DE EMISIONES RCP4.5

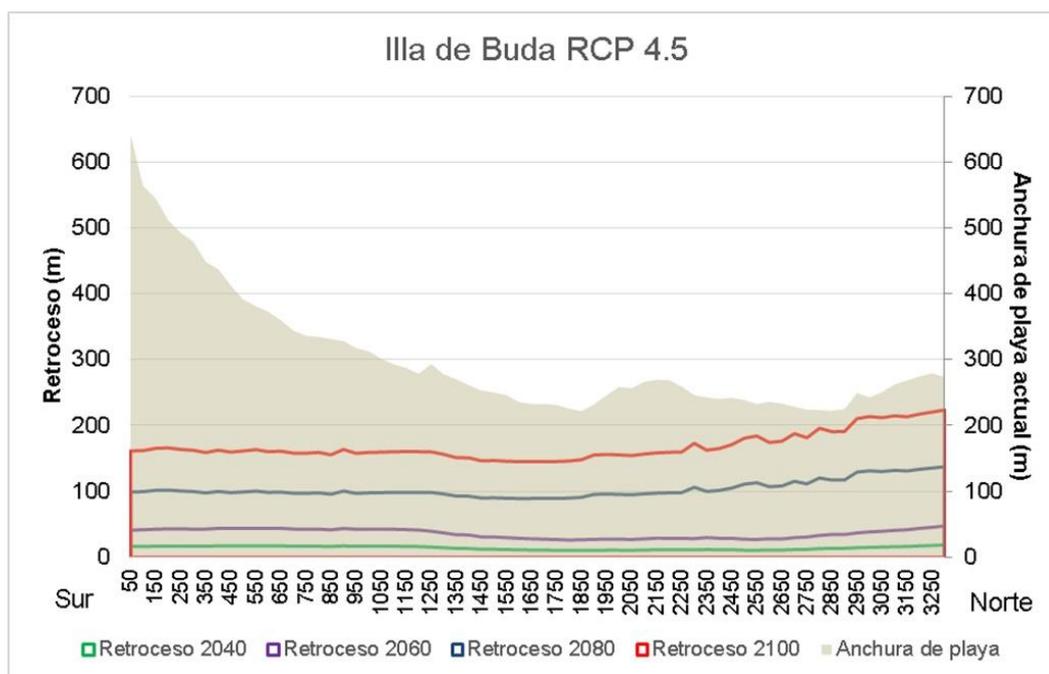


Figura 5.0: Illa de Buda: Anchura de playa (sombreado) y retroceso estimado en metros (curvas correspondientes a 2040, 2060, 2080 y 2100) para el escenario RCP4.5

Año 2040: El retroceso esperado para este año sería general y uniforme a lo largo de la barra, con un valor medio en torno a los 14 m.

Año 2060: En este horizonte, la media del retroceso aumentaría hasta los 36 m, y se puede observar valores algo menores en zonas intermedias de la playa y mayores en los extremos.



Año 2080: Para este año se podría esperar retrocesos, mucho mayores, del orden de los 100 m de media, debido quizás a la consideración de una profundidad de cierre mayor para los cálculos a largo término. Se observa de manera más acusada que el retroceso sería mayor en el extremo norte de la barra, alcanzando los 137 m de máxima, quedando muy debilitada.

Año 2100: Para el último año horizonte considerado los resultados muestran un valor medio del retroceso alrededor de los 168 m, con un máximo de 224 m, lo cual puede tener consecuencias en la morfología de la zona, donde la desembocadura del río se encuentra cercana, y efectos derivados en el transporte de sedimentos. Se afectaría también a la pérdida de superficie en la laguna posterior.

PLAYA ILLA DE BUDA - ESCENARIO DE EMISIONES RCP8.5

El comportamiento es muy similar al observado para el escenario anterior; pero los efectos son mucho más acusados, sobre todo para el largo plazo.

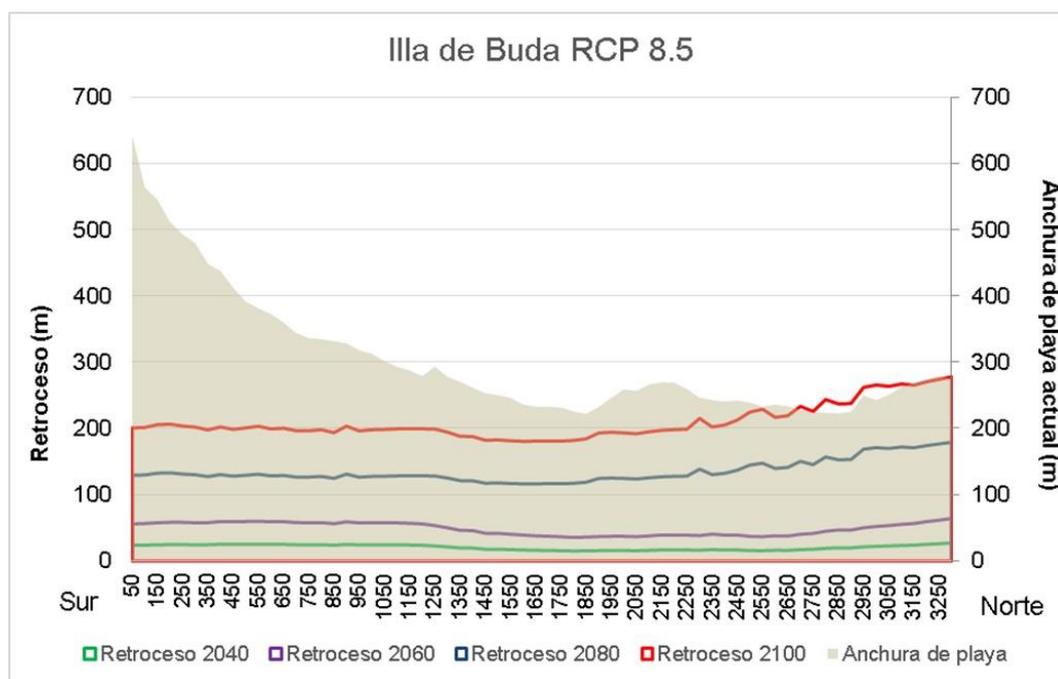


Figura 5.41: Isla de Buda: Anchura de playa (sombreado) y retroceso estimado en metros (curvas correspondientes a 2040, 2060, 2080 y 2100) para el escenario RCP8.5

Año 2040: El retroceso no muestra cambios bruscos a lo largo de la barra, con un valor medio en torno a los 20 m.

Año 2060: En este horizonte temporal se puede apreciar, como en el escenario anterior, un retroceso menor hacia el tramo medio de la playa. Los valores medios están alrededor de los 48 m mientras que el máximo retroceso es de unos 64 m.

Año 2080: Como ocurría en el escenario anterior para el mismo año, el retroceso es bastante mayor en el extremo norte, donde podría alcanzar los 179 m, mientras que la media a lo largo de la playa es de 134 m.

Año 2100: Los valores medios del desplazamiento de la barra en este caso son del orden de los 209 m, siendo el máximo en la zona norte de unos 278 m. Por lo que se esperarían efectos de cambios de orientación de la orilla, con impactos derivados en el transporte de sedimentos y los fenómenos de erosión. Esto influiría también en la forma de la desembocadura y tendría un impacto muy significativo en la laguna Calaix Gran. Es posible que los continuos rebases haya hecho que la laguna haya evolucionado a un marjal; pudiendo haber cambiado el comportamiento de la playa.

PLAYA DEL TRABUCADOR - ESCENARIO DE EMISIONES RCP4.5

En esta playa-barra se pueden observar que los efectos del retroceso presentan variaciones locales de mayor cuantía en algunos puntos, sobre todo en el largo plazo, y que el retroceso es mayor en el extremo sur, donde comienza la punta de la Banyà.

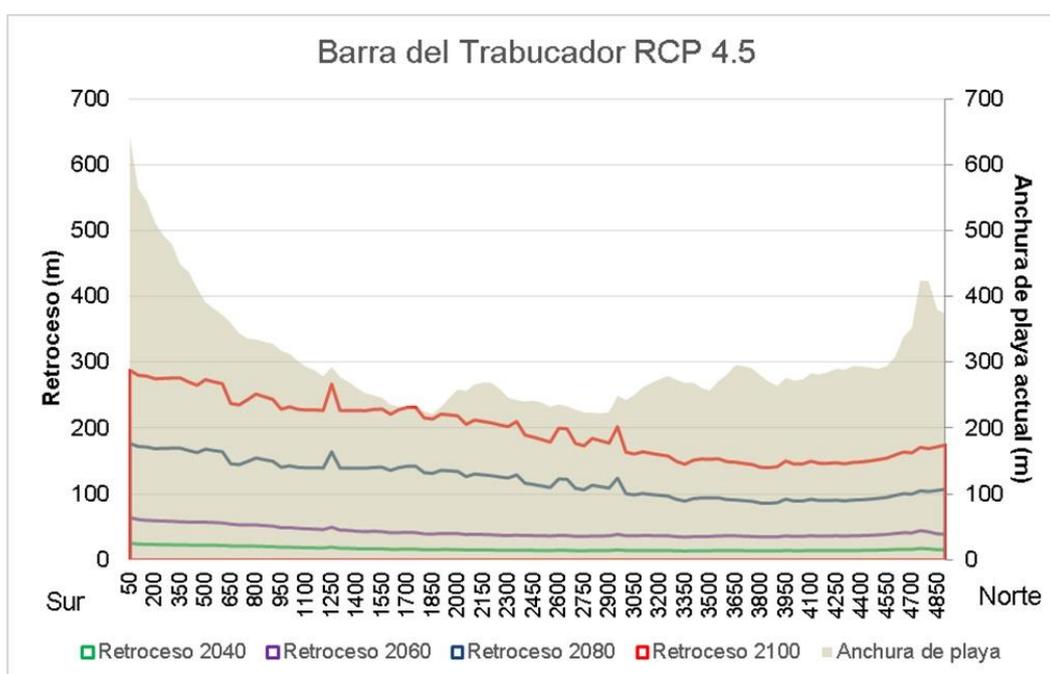


Figura 5.42: Anchura de playa (sombreado) y retroceso estimado en metros (curvas correspondientes a 2040, 2060, 2080 y 2100) para el escenario RCP4.5 en la playa del Trabucador

Año 2040: Para este horizonte, el retroceso medio en todo el tramo sería aproximadamente de 17 m y el máximo se alcanza en la zona sur, con un valor de unos 25 m, que coincide con la zona de mayor anchura.

Año 2060: Para este año, los valores medios del retroceso ascienden a los 42 m, con un máximo de 64 m, también situado en el extremo sur. El desplazamiento se distribuye de forma gradual, casi uniforme y suave a lo largo de la playa. Este retroceso hará que sea frecuente la rotura de la barra con oleajes medios. Por lo que se incrementará la cantidad de sedimento que se deposite en la bahía de los Alfaques.

Año 2080: En el largo plazo, el comportamiento en algunos puntos difiere del de los tramos cercanos y se pueden observar “picos” en el retroceso. Como media se tiene un desplazamiento de 122 m y un máximo de 177 m en el extremo Sur, lo cual podría afectar



a la morfología de la zona. La barra estará muy debilitada en periodos de calma y desaparecerá bajo las aguas con una intensidad media del oleaje; aumentando el trasvase de sedimento hacia el interior de la bahía.

Año 2100: En el último año de horizonte considerado para este escenario los retrocesos alcanzarían los 198 m de media y valores máximos hasta los 288 m, muy significativos, de nuevo en la zona sur, lo que podría acarrear cambios en la orientación de la flecha y con ello, en la erosión y acumulación de sedimentos en la zona. Además, en la cercanía de esta zona se encuentra una explotación de salinas que podría verse afectada por tales movimientos, en el caso de que siguiera en funcionamiento en ese periodo. Un tramo de barra estará sumergido permanentemente, solamente debido al efecto de subida del nivel del mar, y el resto lo hará con intensidades bajas de oleaje o con mareas de medias.

PLAYA DEL TRABUCADOR - ESCENARIO DE EMISIONES RCP8.5

El comportamiento es muy similar al observado en el escenario anterior con valores de los retrocesos más importantes en los rangos que se indican a continuación.

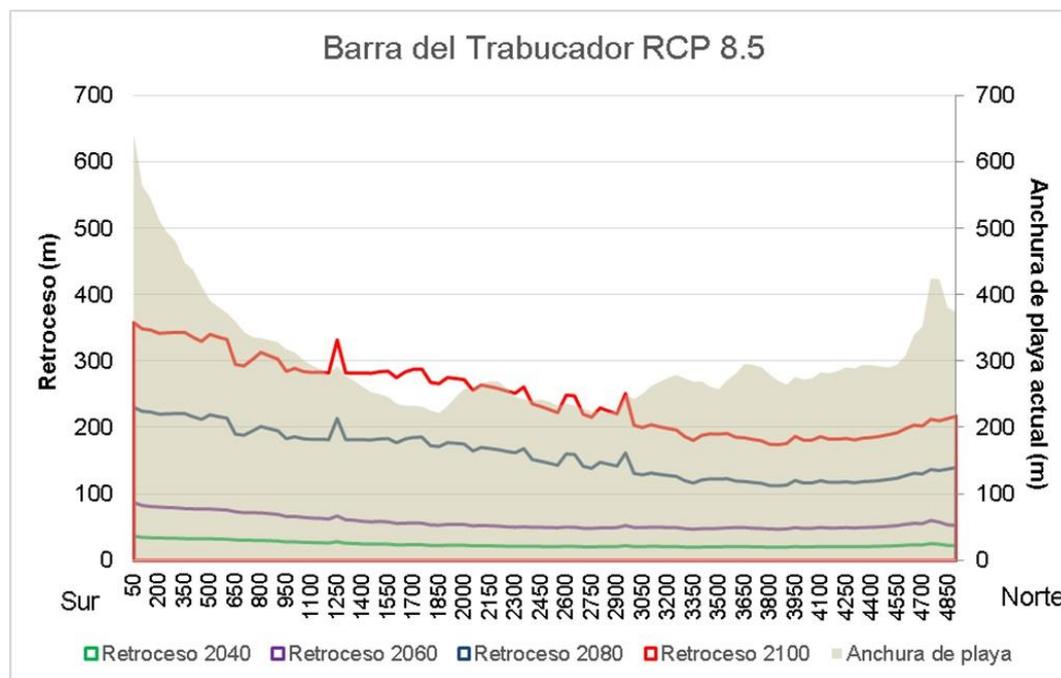


Figura 5.43: Anchura de playa (sombreado) y retroceso estimado en metros (curvas correspondientes a 2040, 2060, 2080 y 2100) para el escenario RCP8.5 en la playa del Trabucador

Año 2040: El retroceso es uniforme en toda la barra, con un valor medio en torno a 24 m, y un máximo de 36 m en el extremo sur.

Año 2060: De igual manera, el retroceso sigue siendo casi uniforme el valor medio de la regresión, de unos 57 m, y aumenta hasta los 87 m en la zona más cercana a la Punta de la Banya.

Año 2080: Se observa un incremento importante en la regresión, debido a la consideración de una mayor profundidad de cierre. Se aprecia una media del desplazamiento de la barra



de alrededor de 159 m, mientras que en el extremo sur se pueden alcanzar los 230 m, del orden de los efectos esperados en el año 2100 para el escenario anterior, lo que supone una aceleración de los impactos; quedando muy debilitada la barra que solamente emergerá en periodos de calma.

Año 2100: La media del desplazamiento en este año para la barra de Trabucador en este escenario sería de 246 m, aproximadamente, siendo el valor máximo de dicho desplazamiento significativamente mayor, del orden de los 358 m, lo cual implicaría importantes modificaciones en la zona, con las consecuencias derivadas de ello sobre el régimen sedimentario y los usos del terreno. Gran parte de la barra desaparecerá bajo las aguas y el resto solamente estará emergente en periodos de calma: siendo muy probable que toda la estructura morfológica, llegado a este punto, se haya transformado; habiendo desaparecido esta forma.

Finalmente, se debe recordar que los efectos indicados anteriormente se producirán solamente debido al transporte transversal de sedimentos que se verán agravados, en algunos casos muy fuertemente, debido al transporte longitudinal de sedimentos. En la mayor parte de otros estudios el efecto erosivo del transporte transversal se ha considerado como independiente de los efectos de la subida del nivel del mar, pudiendo sumarse ambas componentes para tener una idea del efecto combinado de oleaje y subida del nivel del mar (ver resumen de estudios diversos en el capítulo 2).

5.4 ALTERNATIVAS DE ADAPTACIÓN

Para abordar cualquier actuación tendente a reducir los efectos del cambio climático se debe partir del estado actual, como indica la “Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española”, sin actuaciones previas ni solapes de actuaciones; esto es cada alternativa de actuación se debe partir del estado actual con un escenario temporal determinado, y cuando se analice el siguiente escenario temporal hay que empezar de nuevo del estado actual sin tener en cuenta las previsiones de actuación que es hayan tenido en la anterior evaluación.

Una vez analizados los efectos de la subida del nivel del mar en una costa como la del Delta el siguiente paso será conocer los sistemas de protección con que contamos para paliarlos. Siguiendo la citada Estrategia, que a su vez adopta las recomendaciones de los primeros trabajos del IPCC, dentro de las posibilidades que se nos presentan se encuentran las tres siguientes estrategias generales de actuación:

- 1) Acomodación (se mantienen los elementos pero se modifican sus usos). Esta alternativa conlleva el cambio de usos del trasdós, que en determinadas condiciones pueden realizarse.
- 2) Protección (proteger la zona de riesgo). Supone reducir la exposición los efectos negativos que se producen con el cambio climático. Teniendo en cuenta que son soluciones paliativas del problema y no remedian la causa.
- 3) Retroceso (abandono planificado de la zona). Obligaría a las entidades locales y autonómicas a la organización de un abandono planificado de la zona

Tal como se ha expuesto anteriormente, la evolución esperable de los tramos flexibles en ausencia de medidas de adaptación consiste básicamente en el retroceso de la línea de



orilla. Por ello, en este tipo de costas se considera más viable la opción de protección, si bien también puede esperarse hasta que se alcance un umbral de actuación. Por tanto, las posibles medidas de adaptación son:

- 1) No actuar, dejando que la naturaleza actúe libremente, asumiendo la pérdida de anchura de playa, hasta que se alcance un umbral de erosión de intervención. La definición de los umbrales de intervención deberá basarse en estudios de riesgos y análisis del tipo coste-beneficio.
- 2) Protección, mediante el aporte de sedimento que compense la pérdida de anchura de playa y de elevación de la berma.

6 TIPOS DE ACTUACIONES Y SUS CONDICIONANTES

Antes de adentrarse en la propuesta y descripción de las alternativas de actuación para la mejora del Delta del Ebro hay que analizar los condicionantes de la propia estructura deltaica y la tipología de alternativas que pueden realizarse en ella, con sus ventajas e inconvenientes. Para ello, primeramente se analiza este tipo de condicionantes; a continuación se analizan los tipos generales de actuación que son posibles realizar y que se vendrán condicionados por el tipo de costa que se quiera mantener y las actividades que en ella se quieran proteger y preservar; por último, se estudia y analiza las diferentes alternativas que pueden contemplarse según los tipos de problemas y el futuro que se quiera dar al Delta del Ebro.

Este capítulo y su análisis son fundamentales, como paso previo, para conocer las diversas alternativas que se tiene a la hora de proponer actuaciones tendentes a solucionar o paliar los problemas que posee el Delta del Ebro.

6.1 CONDICIONANTES DE LAS ALTERNATIVAS DE ACTUACIÓN

6.1.1 Consideraciones previas

Un delta es una acumulación de sedimento que rebasa la orilla primitiva de la desembocadura de un río debido a que la acción directa del oleaje no ha sido capaz de distribuir el sedimento que aporta el cauce mediante el transporte sólido litoral a lo largo de la costa a un lado y otro de la salida del río. Por tanto, el delta no deja de ser un depósito “temporal” de sedimento cuyo destino más probable es ser redistribuido por el mar a lo largo de la costa adyacente.

Sin embargo, cuando la acumulación de sedimento crece y se mantiene en el tiempo, es frecuente que se utilice para fines y usos humanos, habitualmente agrícolas. Es decir, la citada temporalidad no siempre se percibe por el ser humano y con el tiempo el delta se convierte, de cara a su visión y los usos que le da al delta, como un elemento estático y rígido que tiende a preservar sin considerar los procesos naturales que lo conformaron y que lo condicionan. No obstante, esto le confiere al delta un valor social y económico evidente que se ha enraizado con el tiempo.

En conclusión, existe en el Delta una dualidad (Figura 7.1); en primer lugar se trata de una morfología costera, cuya naturaleza es dinámica, y en segundo lugar es también un espacio socioeconómico, de carácter estático (se basan en la ocupación y utilización del suelo). Ambas situaciones interactúan de forma compleja y son difícilmente compatibilizar, por lo que antes de proponer las actuaciones para la protección del Delta se debe definir es qué tipo de Delta se quiere:



Figura 6.1 Relación entre el tipo de delta y los procesos litorales que pueden darse en el mismo



Las actuaciones propuestas en el Plan atienden a diversas motivaciones (corrección del déficit sedimentario, prevención de la erosión, etc.), por lo que pueden clasificarse de diversas formas, de manera semejante a como podrían clasificarse los procesos que afectan al Delta, que son:

- Por su origen
 - Naturales: p.ej. la dinámica sedimentaria litoral y fluvial, la erosión como consecuencia de temporales.
 - Humanos: p.ej. actividad agrícola, urbanismo costero.
- Por su dinámica
 - Dinámicos: en general todos los procesos naturales, además de la variación de algunos procesos de origen humano.
 - Estáticos: en general todos los procesos humanos tienden a fijar los procesos del Delta.

Este tipo de procesos está muy relacionado con la clasificación anterior, con la que se podrían confundir en muchos casos.

- Por su ámbito geográfico
 - Directos: cuando se producen en el sistema litoral.
 - Indirectos: cuando se producen fuera del sistema litoral.
- Por su extensión
 - Globales: Cuando afecta a todo el conjunto deltaico.
 - Parciales: Cuando afecta a una parte del Delta.

Teniendo en cuenta estas posibilidades de clasificación, en este Plan se ha optado para el análisis y exposición de las posibles alternativas de actuación por la clasificación basada en la extensión.

A continuación se expondrá de manera muy breve alguna consideración relativa a cada tipo de actuación por su extensión. Más adelante se detallará el análisis de cada uno de estos problemas (apartado 6.3) y las alternativas de actuación para cada uno de ellos (apartado 6.4).

6.1.2 Tipos de actuación por su extensión

Antes de abordar los tipos de actuaciones que se tienen como alternativa para solucionar los problemas inherentes al Delta del Ebro y su costa, parece conveniente delimitar estas actuaciones en el espacio. Desde ese punto de vista existen dos tipos de actuaciones:

- 1- Globales
- 2- Parciales

En el primer tipo la actuación o actuaciones planteadas se extienden a toda la costa del Delta y su sistema litoral, mientras que en la segunda solamente lo hacen en una parte de ese sistema, generalmente con el objeto de solucionar problemas locales, no relacionados con el entorno adyacente.

Los tipos de actuaciones globales solamente se pueden plantear teniendo presente qué tipo de delta se pretende proteger (Figura 7.1), es decir, una morfología costera con naturaleza dinámica o una unidad estable capaz de albergar todo un conjunto de actividades socioeconómicas, y de ello se ocupa el apartado siguiente. Se debe tener en cuenta que



cuando la actuación es global afectará a todo el sistema litoral, por lo que este tipo de actuación condicionará el comportamiento y evolución futura del Delta.

Por el contrario, las actuaciones parciales responden a los problemas puntuales detectados a lo largo del Delta y bien planteados por ejemplo en el informe del LIM-UB (2000), en su volumen II (apartado 2.2.1), y que responden a dos ámbitos: Actividad económica y ámbito medioambiental.

Todas las actuaciones que se planteen deben conllevar inexorablemente un seguimiento y la posibilidad de una revisión y evaluación con el tiempo. El escenario final debiera considerarse en sus tres aspectos: Económico, social y medioambiental.

6.2 TIPO DE ACTUACIONES Y ALTERNATIVAS A CONSIDERAR

6.2.1 Descripción general de las alternativas consideradas

Los tipos de actuaciones que se pueden emprender, como se ha indicado en el primer apartado de este capítulo, tienen dos condicionantes básicos que responderían a dos preguntas. En primer lugar, qué tipo de Delta se quiere; y en segundo lugar, qué tipo de actividad se quiere preservar. Como se indicaba anteriormente, la interacción entre morfología costera de naturaleza dinámica y suelo estable es compleja, pero ambas situaciones son compatibles, aunque probablemente no lo sean exactamente como lo han sido hasta ahora.

Por tanto, en línea con las alternativas para la adaptación al cambio climático de la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático en la Costa Española, se plantean para el Delta tres alternativas:

- Acomodación al cambio, controlando la evolución (morfología costera dinámica); puede realizarse de dos formas:
 - Dando libertad de actuación a los procesos costeros, permitiendo una evolución natural, pero controlada mediante actuaciones de defensa costera, adaptándose a los procesos existentes sin abandonar el Delta.
 - Controlar los procesos sedimentarios, revirtiéndolos en su caso, sin permitir que el Delta tenga una evolución significativa con respecto a su morfología actual (control de la erosión).
- Protección, para mantener su forma actual (morfología estable y espacio socio-económico estático).
- Retirada o abandono paulatino, dejando libertad de movimientos al Delta, pero sin actuaciones de adaptación (morfología costera dinámica).

Estos tipos de actuación serían los que se contemplan a la hora de abordar un problema costero en el que existe una discordancia entre la cantidad de sedimento existente en el sistema litoral y la dinámica litoral reinante. A continuación se describen a grandes rasgos estas tres alternativas, que se detallarán en los siguientes apartados.



CEDEX

La acomodación al medio podría realizarse de dos maneras básicas, como se ha indicado más arriba: permitiendo una evolución natural controlada y revirtiendo procesos costeros para minimizar la erosión costera (revertir procesos, introduciendo sedimento en la fuente para que se reduzcan las erosiones). En este segundo caso, se puede realizar de tres maneras distintas:

- 1- Trasladando el sedimento (arena) retenido en los embalses de la cuenca del Ebro y aportándolo a la desembocadura para compensar el déficit de arena que muestra el balance sedimentario (apartado 4.3).
- 2- Aportando el volumen de arena deficitaria (apartado 4.3) de una fuente exterior al sistema.
- 3- Realizando una recirculación de la arena del sistema, trasladando el sedimento de las zonas de depósito (sumideros o playas en aumento) a la zona donde la fuente distribuye el material (proximidades de la desembocadura).

Estos puntos podrían considerarse como “protección de la costa”, si bien se ha preferido situarlos como “acomodación” por no alterar de forma significativa los procesos costeros y la dinámica litoral actual.

La protección de la costa para que ésta permanezca estática, o con fluctuaciones muy controladas puede realizarse de diferentes maneras, que dependen de la rigidez que se quiera dar al sistema. Así, se contemplan dos opciones básicas:

- 1- Reducir la dinámica litoral lo máximo posible: esto requiere una gran rigidización del sector, impidiendo que el material se mueva de las celdas en las que se debería compartimentar la costa, e intentado aislar el trasdós de la propia ribera del mar. Esta alternativa supone que no se permite el movimiento de sedimentos a lo largo de la franja litoral, al menos en una gran parte, para lo cual sería necesario un número importante de obras rígidas como espigones, diques longitudinales, etc.
- 2- Reducir la intensidad de la dinámica litoral: es un tipo intermedio entre la rigidización total y el libre movimiento de la arena a lo largo de la costa. El objetivo es que el mar mueva el sedimento pero en menores cantidades que en el estado inicial; para lo cual se realizan apoyos intermedios cortos que permitan que parte del material se mueva a lo largo de la costa, teniendo en cuenta que los apoyos no deben llegar a la profundidad de cierre. El porcentaje de material que estos apoyos dejan pasar debe ser proporcional al aporte de arena de la fuente y estar en consonancia con el déficit sedimentario.

La retirada o abandono paulatino del frente litoral es una de las alternativas contempladas para la adaptación del cambio climático, y conllevaría de hecho permitir una evolución natural. La diferencia que existe entre una y otra es que en este caso, la acción humana es pasiva: se permite la libre evolución de los procesos y lo que se hace es que cuando sus efectos afecten a la actividad humana ésta se debe retirar ordenadamente.

A continuación se detallan más cada una de estas opciones. En cada una de ellas se ponen ejemplos de propuestas realizadas para solucionar los problemas costeros y de adaptación al cambio climático que se han hecho a lo largo del tiempo.



6.2.2 Acomodación al cambio

Se puede realizar de dos maneras diferentes, según se ha indicado en el apartado anterior: 1) Dejando que el sistema evolucione libremente, y 2) Introduciendo sedimento en la fuente para que se reduzcan las erosiones.

6.2.2.1 Evolución natural, controlada

Esta alternativa consiste en permitir que el Delta evolucione de una manera controlada mediante actuaciones como las que se describen a continuación. Se considera que de esta forma no se están alterando los procesos costeros naturales actuales.

Esta alternativa asume que las actividades humanas que se desarrollan en la cuenta (como regulación de caudales y explotación urbana y agrícola) son de alguna manera “elementos naturales” que le afectan pero sobre los que no se actúa en el presente Plan, pero sin renunciar a que otros Planes y Estrategias lo hagan.

En este caso lógicamente habría que solucionar también los problemas locales, de índole medioambiental y económica, que muy bien analizó el trabajo del LIM-UB (2000) en los volúmenes I y II que se han resumido en el capítulo 2 de este Plan.

Ejemplo de este tipo de alternativas son las propuestas de actuación que contiene el trabajo del LIM (2011) que son las mismas que se recomiendan en LIM (2018) y que se desarrollan en Galofré et al. (2012) y Galofré y Jiménez (2016) y que se resumen a continuación:

En primer lugar, para favorecer la adaptación de la costa exterior, se propone crear y liberar un espacio de acomodación donde se eliminen los obstáculos preexistentes (Figuras 6.2 y 6.3).

Asimismo, dado que el problema analizado es de largo plazo y la disponibilidad sedimentaria puede verse afectada localmente, debido al posible agotamiento del estrato de arenas, es recomendable hacer un seguimiento del stock sedimentario en aquellas áreas más sensibles para determinar la necesidad de actuaciones adicionales. Como aspecto añadido se destaca que a corto plazo es previsible que el mantenimiento de una franja costera sin obstáculos facilite la acomodación de la línea costera deltaica a las dinámicas naturales, a la vez que se mejora la calidad ambiental general de la zona.

Dentro de las propuestas del LIM (2011 y 2018) para la adaptación al cambio climático también se encuentra dejar libre los movimientos de las flechas, sin ninguna acción de protección ni acomodación, si bien por estar dentro de la misma propuesta se ha incluido en este epígrafe.

En el informe de LIM (2018) se indica lo siguiente: “...no se considera necesario actualmente implementar la medida propuesta de alimentar artificialmente ambas flechas para mantener su elevación con respecto al nivel del mar. En cambio se recomienda mantener la continuidad del transporte de sedimento hacia ambas flechas eliminado cualquier obstáculo que esté presente (o se pueda presentar) a lo largo de la costa externa [...] habría que considerar que esta es la evolución natural de este tipo de sistemas barrera en esas condiciones y, habría que valorar la necesidad de mantenimiento artificial del mismo en las condiciones futuras.”

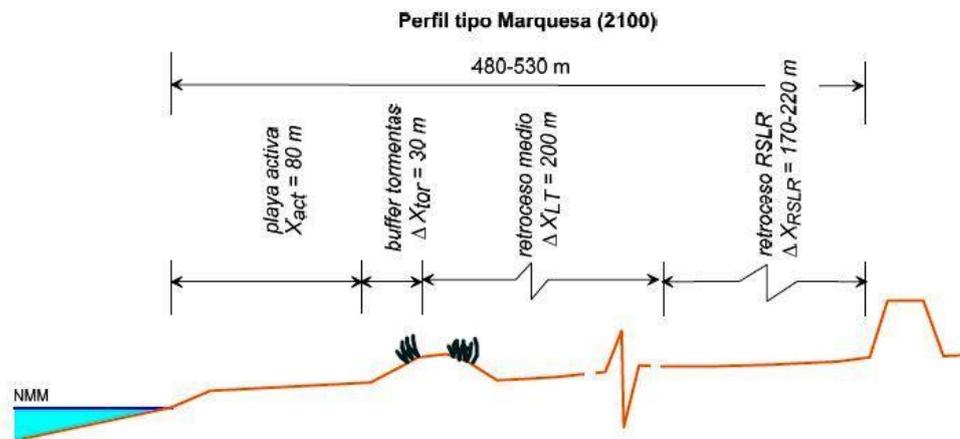


Figura 5.5. Perfil de playa tipo con el espacio de acomodación necesario para facilitar la adaptación natural a lo largo de la costa Norte del delta del Ebro (sector Playa de la Marquesa) bajo diferentes escenarios (RSLR).

Figura 6.2: Perfil tipo propuesto por el LIM (2011 y 2018) para la zona norte del Delta

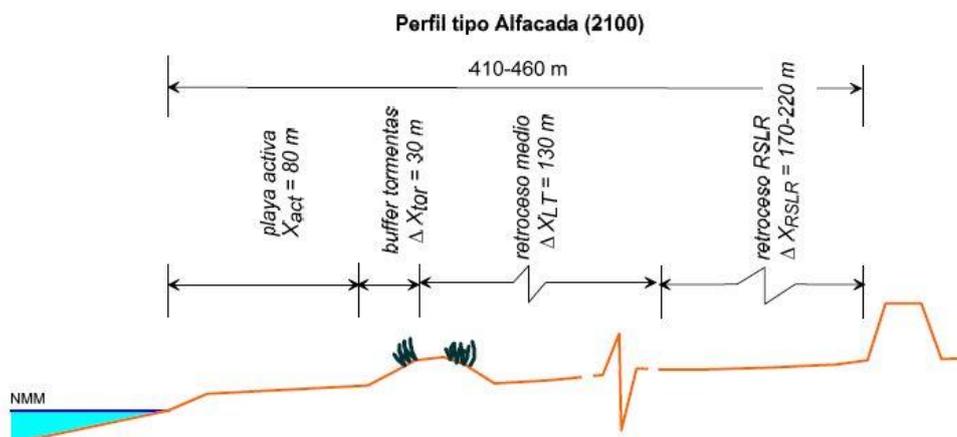


Figura 5.7. Perfil de playa tipo con el espacio de acomodación necesario para facilitar la adaptación natural a lo largo del lóbulo central del delta del Ebro (sector Alfacada) bajo diferentes escenarios (RSLR).

Figura 6.3: Perfil tipo propuesto por el LIM (2011 y 2018) para la zona central del Delta

6.2.2.2 Restablecimiento de los aportes sedimentarios

Las dos actuaciones planteadas en el epígrafe anterior (creación de una zona de protección/acomodación y mantenimiento de la continuidad del transporte sedimentario) podrían ser más duraderas con el mantenimiento de un transporte longitudinal estable, para lo cual podría necesitarse aportar material al Delta, ya que en el estado actual no se dispone del sedimento necesario.



Esta falta actual de aportes sedimentarios se podría contrarrestar con tres actuaciones posibles, que se describen seguidamente, indicando sus ventajas e inconvenientes.

TRASLADO DEL SEDIMENTO RETENIDO EN LOS EMBALSES DE LA CUENCA DEL EBRO

Esta acción conllevaría actuar sobre el sistema que produce sedimento para que el río lo transporte y lo vierta en el mar, es decir, tomar las arenas depositadas en los embalses de la cuenca de río Ebro y trasladarlas a las proximidades de la desembocadura.

La cuantificación de los sedimentos que se detraen de ser transportados al mar no es fácil, ya que las variables que influyen en esta cantidad son numerosas: el sedimento real válido para la formación, desarrollo y acreción de la costa del delta; La cantidad de sedimento detraída por otras actividades como urbanismo, agricultura, reforestación, etc.; La onda de transporte de sedimentos a lo largo del río, sus depósitos y reordenación por tamaños, etc. A todo ello habría que añadir el análisis coste-beneficio de estas obras para la sociedad en su conjunto y, finalmente el coste de reversibilidad de los procesos, si es que puede realizarse, sin alterar los beneficios de la regulación de la cuenca y el uso de sus aguas.

Si se optase por esta medida, hay que tener en cuenta que los aportes desde los embalses deben realizarse para periodos cortos ya que de lo contrario los depósitos podrían alterar la desembocadura y los procesos costeros del entorno. Esta circunstancia hace que se tenga que mantener un trasvase continuo de material de las zonas de extracción del embalse a la desembocadura, y debe ser compatible con la explotación de la propia obra hidráulica, y de las redes de transporte del material. Y cumpla con la evaluación de impacto ambiental correspondiente.

De cualquiera de las formas, estas actuaciones quedan fuera del alcance de este Plan, y tienen importantes inconvenientes que se han señalado en el apartado 3.3. Por otro lado, solamente serían válidas si se reflejasen en una solución real de aumento de capacidad de vertido de sedimento del río Ebro al mar. Pero aun así se encontraría con otro problema y es que la dinámica fluvio-marina se ha adaptado a una nueva realidad y ha transformado esa inter-fase que es la desembocadura. Cuando la regulación del río era menor, cuyo ejemplo podía reflejarse en las Figuras 1.4, 2.44 y 2.45, la capacidad del caudal vertido por el río al mar compensaba energéticamente a la capacidad del mar de introducirse en el cauce. Cuando ésta desapareció, o fue reduciéndose, entonces el mar impedía con más fuerza ese desagüe y el río buscó una nueva salida con menor energía a la que enfrentarse: la desembocadura actual. Por ello, aunque se fuera capaz de volver a poner el sedimento en las proximidades de la desembocadura, lo que no va ser posible es conseguir la energía que entonces tenía el río y hacía que ese caudal sólido saliese hacia el mar y que la desembocadura volviese a adaptarse al equilibrio energético fluvio-marino.

REPOSICIÓN DEL DÉFICIT DE SEDIMENTO DE UNA FUENTE EXTERIOR AL SISTEMA

La forma de actuar sería similar al caso anterior; si bien ni el método ni el origen del material es el mismo. Habría que buscar un yacimiento que fuese capaz de suministrar el déficit de arena del sistema, con características granulométricas compatibles, y medioambientalmente sostenible, cumpliendo la evaluación de impacto ambiental correspondiente.

Si el yacimiento es terrestre las dificultades de explotación serían similares a mantener una cantera durante un tiempo prolongado en funcionamiento. Las dificultades de transporte y los problemas que acarrea son similares al caso anterior (gálibo, vida útil de la plataforma,



CEDEX

compatibilidad con el tráfico, etc.), teniendo en cuenta que debe realizarse cada cierto tiempo en un periodo prolongado.

Si el yacimiento es marino, hay que tener en cuenta de igual forma que las extracciones presumiblemente serán periódicas.

RECIRCULACIÓN DE LA ARENA DEL SISTEMA

La recuperación de aportes sedimentarios interiores al sistema se podría realizar si se convierte el sumidero de sedimento en fuente; para ello se debe localizar el lugar de depósito del sedimento en el sistema litoral (apartado 4.1.3) tomarlo y depositarlo donde la fuente de sedimento lo deposita al llegar al mar.

Esta actuación, que consiste en la gestión del sedimento dentro de la unidad fisiográfica necesita de una serie de datos adicionales y acciones colaterales para tener garantías de éxito. En primer lugar, se debe conocer con una cierta exactitud el origen de los sedimentos depositados en los sumideros, así como los lugares donde éstos pueden ser tomados sin alterar otros sistemas. Además, tienen que determinarse los siguientes ítems: la cantidad a extraer y a depositar en cada uno de los lugares escogidos; el periodo y frecuencia de estas extracciones y depósitos que tendrían que adaptarse al clima marítimo y la demanda de sedimento para el transporte; los puntos y elementos de control; el seguimiento para observar los resultados; etc.

También podría pensarse en alterar algunas de las variables del proceso como es la desembocadura abriendo la antigua salida o incluso utilizar una gola o realizar ramificaciones de la desembocadura. Estas actuaciones son factibles para eliminar el desequilibrio sedimentario que se produce en la actual salida y ello se analiza cuando se trate de este problema en apartados siguientes. Pero, en todo caso, esta alteración tendría que sustentarse en estudios y ensayos de su idoneidad y eficacia.

6.2.3 Protección de la costa

Esta tipología de actuaciones se basa la siguiente premisa: se considera imprescindible que el Delta se mantenga en su estado actual y, por tanto, no se permitan evoluciones que cambien su forma; solamente sería admisible un aumento generalizado de la superficie deltaica (no contemplable en ninguno de los escenarios posibles actuales).

El objetivo de este tipo de actuación es aislar la plataforma deltaica de los avatares de la acción marina, oleaje y subida del nivel del mar principalmente. Ello lleva a un acorazamiento de la plataforma transformando su forma flexible en otra rígida; al menos en lo concerniente a su frontera con la geografía exterior. Este método puede denominarse "holandés", ya que es similar al que se ha utilizado históricamente en Holanda para ganar terrenos al mar.

El modelo holandés consiste básicamente en construir un elemento rígido que eleve la cota de rebase frente al mar, protegiendo el terreno de inundaciones marinas. Frente a él, en el lado exterior (hacia el mar) se puede construir una franja de protección flexible, que a su vez proteja al dique y permita una cierta movilidad de sedimento a lo largo de la costa. En los lugares donde esto no pueda llevarse a cabo, como la barra del Trabucador, las defensas frente a la acción del mar cambian por otros elementos como diques exentos, arrecife, etc.

Este tipo de alternativas de actuación se propusieron a comienzo de la realización de los estudios de estabilización del Delta (LIM, 1992²) donde la rigidización se hacía mediante espigones y alimentación artificial (Figura 6.4)

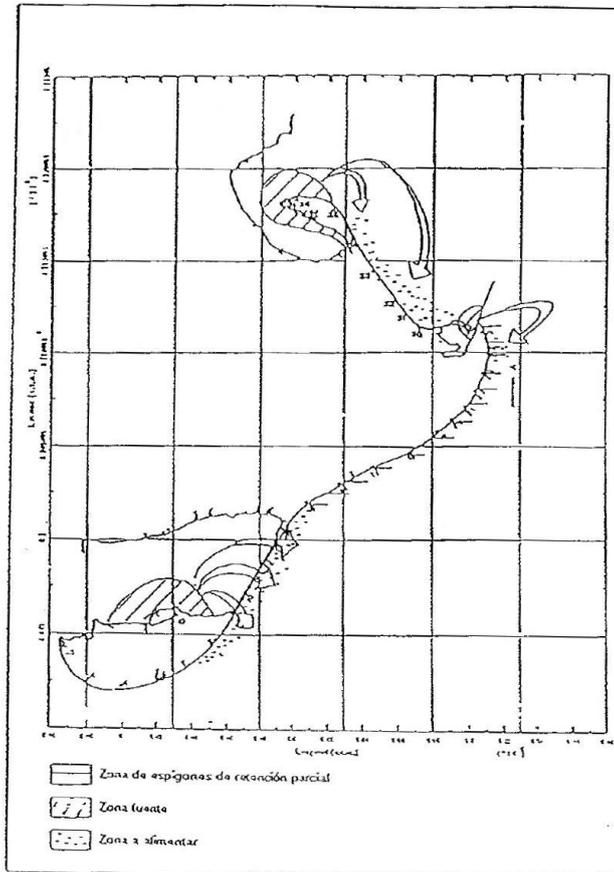


Figura 6.4: Propuesta de estabilización rígida del Delta del Ebro mediante espigones y alimentación artificial del LIM (1992²)

También otros proyectos de entonces (IBERINSA, 1992) se aventuraban a rigidizar y cambiar la desembocadura (Figura 6.5) rigidizando ésta con diques de encauzamiento de una cierta robustez (Figura 6.6).



PLAN PARA LA PROTECCIÓN DEL DELTA DEL EBRO

Anejo 5. Plan para la protección del borde litoral del Delta del Ebro

CEDEX

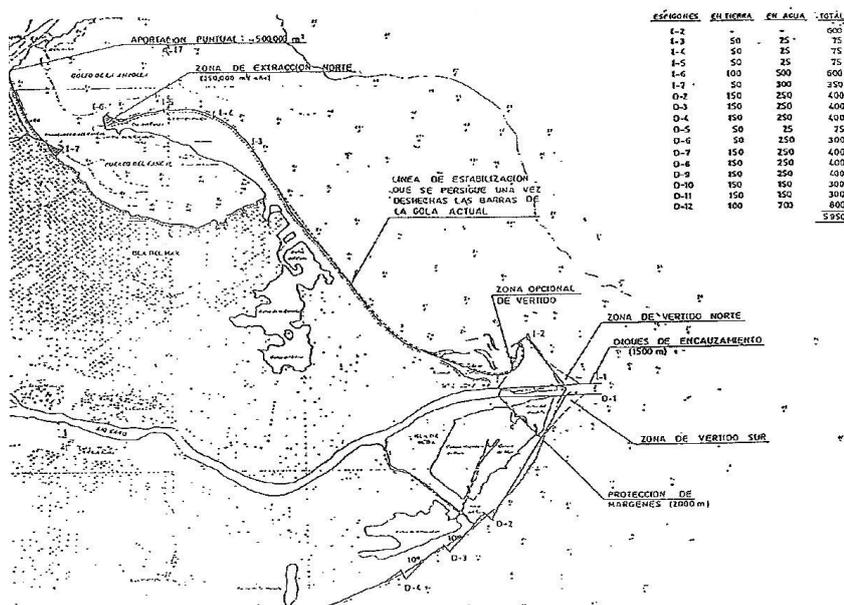


Figura 6.6: Rigidización del Delta del Ebro en una de las propuestas de IBERINSA (1992)

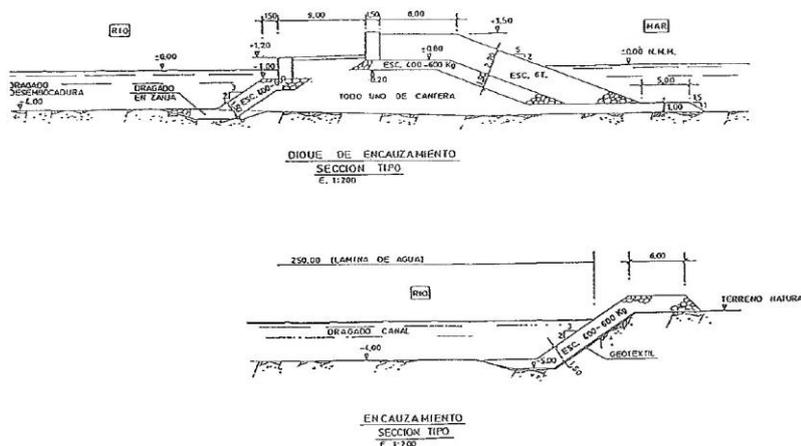


Figura 6.5: Secciones de los diques de encauzamiento de la desembocadura del río Ebro propuesta por IBERINSA (1992)

También se diseñaron defensas con diques exentos a lo largo de las costas del Delta, pero ninguno de estos trabajos se llevó a término; solamente actuando parcialmente en la playa del Trabucador y en la playa de la Marquesa (apartado 2.2) con obras blandas y recuperación de terrenos.

La propuesta más moderna de este tipo de alternativas proviene del trabajo realizado por Berga y Berga (2017) para la Comunitat de Regants del Canal de la Dreta, en la que se propone una rigidización de la plataforma deltaica (Figura 2.91). Esta propuesta se basa en tres actuaciones:

- 1- Construcción de un camino de guarda (dique de protección) en una longitud de unos 50 km para la protección de la llanura deltaica con cotas entre 1,5 y 2 m y ancho de 4 a 5 m (Figura 6.7); tomada de Galofré et al (2012).
- 2- Recrecimiento de las flechas deltaicas con aportación de arena hasta una altura entre 1 y 2 m.
- 3- Protección del frente costero mediante dunas en islas litorales exentas de baja cota.

A la que habría que añadir una cuarta de control de caudal de salida del Río mediante, lo que Berga y Berga (2017) denominan barrera salina (Figura 6.8).

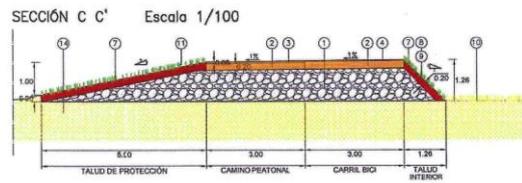


FIGURA 14.34. SECCION TIPO TRANSVERSAL DEL DIQUE DEL CAMINO DE GUARDA

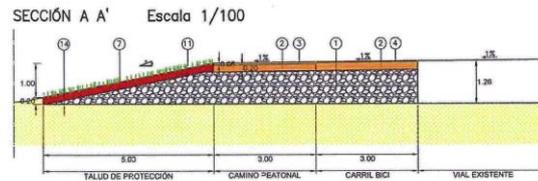


FIGURA 14.35. SECCION TRANSVERSAL DEL DIQUE DEL CAMINO DE GUARDA EN LOCALIZACIONES DONDE HAY VIALES PREEXISTENTES

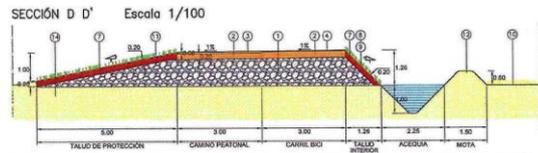


FIGURA 14.36. SECCION TRANSVERSAL DEL DIQUE DEL CAMINO DE GUARDA EN LOCALIZACIONES DONDE HAY ACEQUIAS Y DRENAJES PREEXISTENTES

Figura 6.7: Secciones tipo de los diques del camino de guarda que cerrarían la plataforma del Delta rigidizándola (Fuente: Berga y Berga, 2017)

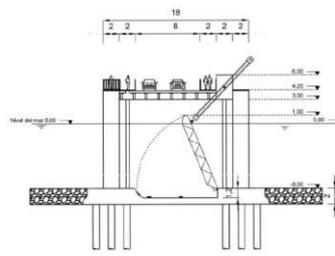


FIGURA 18. SECCION TRANSVERSAL CON COMPUERTA ABIERTA

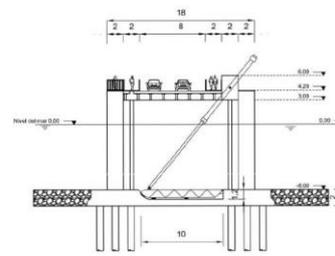


FIGURA 19. SECCION TRANSVERSAL CON COMPUERTA CERRADA

Figura 6.8: Compuertas de control de caudal como barrera salina cerca de la desembocadura del río Ebro (Fuente: Berga y Berga, 2017)



El problema que tiene este tipo de alternativas es la desnaturalización de la costa del Delta. En los primeros casos lo que se actúa es sobre la dinámica litoral, reduciendo el movimiento de sedimentos a lo largo de la costa mediante obras de defensa, espigones o diques exentos y en el segundo de ellos (Berga y Berga, 2017) no se reduce esta dinámica, sino que se interpone un muro, dique frente a ella cuando lo alcance; con un deterioro del medioambiente litoral con la desaparición de la playa.

6.2.4 Retirada o abandono de la zona activa de costa

La retirada o abandono de la costa puede entenderse de dos maneras: La retirada parcial de una pequeña franja costera de manera estratégica, que es la contenida en el apartado 6.2.2.1, o la retirada parcial pero progresiva, que contempla una evolución natural que afectará a una serie de asentamientos sobre los que hay que pensar en su reubicación paulatinamente.

Estaría ligada con la acomodación ya que ésta pudiera llevar aparejado la retirada parcial de zonas cercanas su reubicación que pueden ser por fases tanto temporales como espaciales según se vaya apreciando la acción del cambio climático en la evolución de la costa. Ello implicaría una planificación en el tiempo unida con una previsión y seguimiento de su evolución.

6.3 ANÁLISIS DE LOS PROBLEMAS COSTEROS EN EL DELTA

Los tipos generales de actuaciones expuestos en el apartado anterior tienen como objetivo remediar o paliar los problemas existentes en el Delta en la actualidad, que se pueden ver agravados con la subida del nivel del mar debido al cambio climático (capítulo 5).

Los problemas detectados a lo largo de las costas del Delta, y que en su mayoría describen los principales estudios realizados recientemente (apartado 2.1) se pueden subdividir según afecte de manera global al sistema litoral o de manera parcial a alguna de sus zonas. Siendo éstos:

Problemas globales (Figura 2.88):

- Falta de aportes de sedimentos por parte del río lo que lleva a un déficit sedimentario y a la aparición de zonas en estado erosivo casi permanente. Siendo especialmente importante en las playas de la Marquesa y Riumar, Illa de Buda y Barra del Trabucador.
- Descompensación sedimentaria debido a que la desembocadura se encuentra dirigida hacia el norte; lo que hace que prácticamente nada de sedimento se incorpore al transporte sólido litoral en el hemidelta sur, incrementando el problema erosivo en las playas de Illa de Buda y Trabucador.
- Falta de regulación y control de los sumideros y sus agentes lo que lleva a no conocer, por ejemplo, los efectos que producen los dragados en la zona sur de los Alfaques (apartado 4.3.4 y Figura 4.65), o la capacidad de llenado de las dos bahías (Figuras 4.19, 4.20 y 4.22).



- Inundación de la plataforma deltaica producida especialmente en los temporales y agravada por la subida del nivel del mar (Figura 2.85). Estos problemas son especialmente importantes en la playa de la Marquesa y Riumar, laguna de la Alfacada o Illa de Buda, laguna de la Tancada, Barra del Trabucador y zonas interiores de la bahía de los Alfaques (Figura 2.105).

Problemas parciales (LIM, 2000 y 2011):

- Ordenación de las playas y sus servicios como aparcamientos o chiringuitos de playa, que sean compatibles con la protección y situación medioambiental del entorno del Delta.
- Ocupación urbana de la franja litoral más próxima al mar y humedales inundables, hallándose en la playa de la Marquesa, Riumar, bahía del Fangar, Garxal o en la franja costera de la Platjola y Tancada.
- Ocupaciones agrarias que se sitúan en una gran parte de la llanura deltaica, especialmente arrozales, y que pueden verse afectados por las transformaciones que se producen en ella y, a su vez, pueden ejercer de elemento de presión sobre la libre evolución de las playas.
- Ocupación de actividad salinera en la península de la Banyà que obliga a mantener una serie de servicios esenciales como son el suministro eléctrico (cable submarino) y tránsito rodado a través de la Barra del Trabucador.
- Vertido de fangos orgánicos provenientes del drenaje de la llanura deltaica y de su actividad agraria que producen estados de eutrofización de las bahías del Fangar y los Alfaques.
- Estado medioambiental de las lagunas con presiones tanto de intrusión salina como debido a la actividad agraria que lleva a un deterioro medioambiental, como sucede en la Platjola.
- Sensibilidad ecológica de las bahías y presión sobre ellas que hace que los aportes de agua continental sea fundamental para preservar su estado especialmente importante en la bahía del Fangar que es la de menor superficie.

6.3.1 Análisis de los problemas globales

A continuación se analiza cada uno de esos problemas y los tipos de soluciones que pueden dárseles, indicados en líneas generales en el apartado 6.2.

6.3.1.1 *Falta de aportes de sedimentos*

Los deltas se forman por la diferencia existente entre la cantidad de material sólido que el agua de un río transporta hacia el mar y la capacidad que tiene el mar de distribuirlo a lo largo de las costas a lo largo del tiempo. Por tanto, es esencial que exista, al menos un equilibrio entre la cantidad de sedimento aportado y el distribuido; de no existir dicho equilibrio el delta puede estar en erosión –si el mar transporta más que lo aportado por el río- o en aumento –si el mar transporta menos que lo aportado por el río-.



CEDEX

En la actualidad, tal como se ha expuesto en los capítulos 2 y 3, existe en el Delta del Ebro un claro déficit de sedimento como consecuencia fundamentalmente de la regulación del río y el uso intensivo del suelo en la cuenca, lo que ha dado lugar a un importante proceso erosivo en el Delta que se ha expuesto a lo largo de todo este informe técnico. Las Figuras 6.9 y 6.10 ilustran esta disminución de los aportes sedimentarios en el Delta como consecuencia de la construcción de las grandes presas del río Ebro.

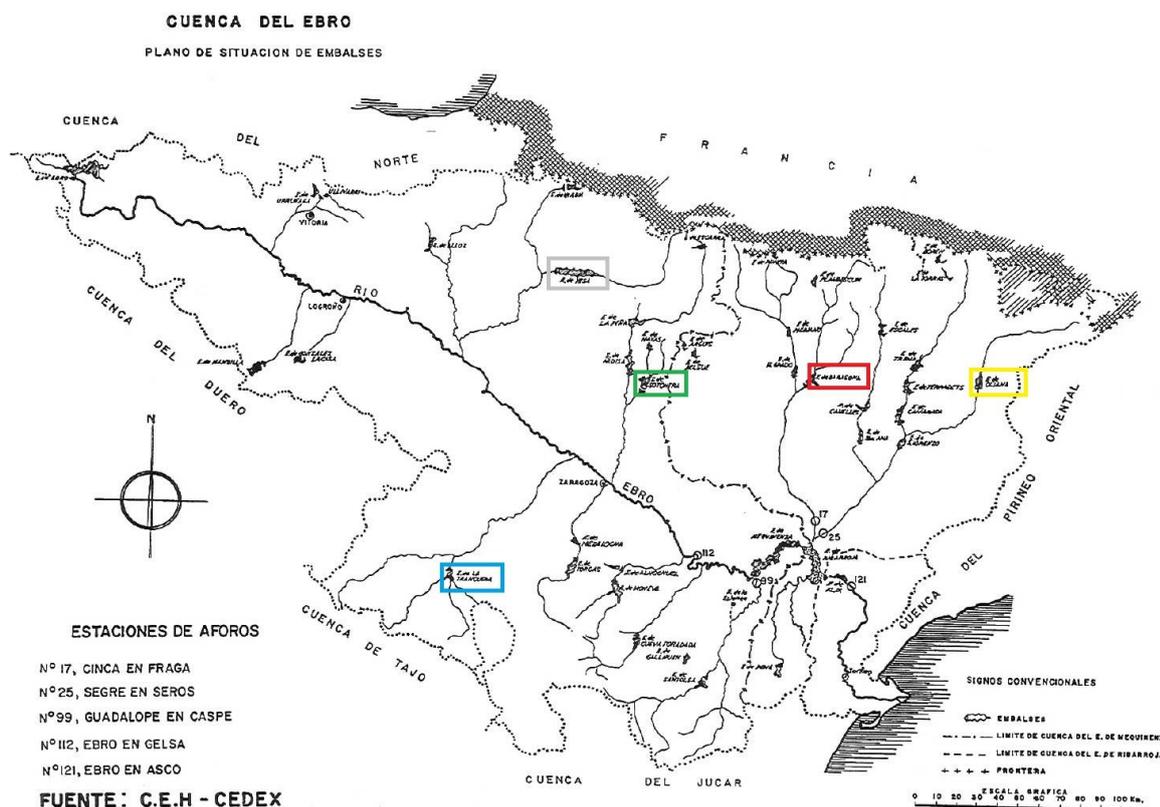


Figura 6.9: Cuenca del río Ebro con la situación de sus grandes presas y los límites de la cuenca de aportación de la presas de Mequinenza, Ribarroja, y Flix, recuadrados los embalses con sedimentos de arena (Fuente: CEH-CEDEX y Peña, 1996)

Así, en la Figura 6.10 se muestran datos sobre el tamaño de sedimento retenido varía entre el 14,44% del embalse de La Traquera, en la margen izquierda en Zaragoza, y el 4,02% del embalse de Yesa en el pre pirineo navarro.

RECONOCIMIENTOS BATIMETRICOS DESDE 1976 A 1987

E M B A L S E S

	BARASONA	MEQUINENZA	MONEVA	SANTOLEA	SOTONERA	LAS TORCAS	LA TRAQUERA	GALLIPIEN	OLIANA	RIBARROJA	YESA
FECHA DE CONSTRUCCION	1932	1966	1929	1932	1961	1946	1960	1927	1959	1969	1960
FECHA DE RECONOCIMIENTO	1986	1982	1984	1979	1986	1979	1979	1979	1985	1982	1986
AÑOS FUNCIONAMIENTO	54	16	55	47	25	33	19	52	26	13	26
CAPACIDAD INICIAL HM3	71	1533	10	40,5	189	9	84	4	101	219,55	471
CAPACIDAD ACTUAL HM3 EN LA FECHA DE RECONOCIMIENTO	59,67	1437	8	37,92	181,58	7,06	83,8	3,16	85,80	206,88	450,33
APORTACION SOLIDA RETENIDA HM3	11,33	96	2	2,13	7,42	1,94	0,2	0,84	15,20	12,67	20,67
APORTACION SOLIDA MEDIA RETENIDA HM3/AÑO	0,21	6	0,036	0,045	0,3	0,06	0,01	0,02	0,585	0,97	0,79
VIDA PROBABLE EMBALSE TRAS PUESTA EN CARGA	333	255	277	909	625	151	1999	250	172	225	588
ARENA %	4,54	-	-	-	10,08	-	14,44	-	7,94	-	4,02
LIMO %	71,36	-	-	-	64,19	-	61,98	-	73,62	-	66,36
ARCILLA %	24,10	-	-	-	21,25	-	23,50	-	20,44	-	29,62
P. VOLUMETRICO TN/M3	1,087	1,2	1,2	1,2	1,107	1,2	1,107	1,2	1,134	1,2	1,045
SUP. CUENCA M2	1499	57444	470	1236	2379	445	1473	65	2694	24470	2054
DEGRADACION ESPECIFICA TN/KM2 AÑO	152	131	92	44	140	161	8	369	246	48	402
APORTACION HIDRICA MEDIA HM3	200	8600	5	110	919	37	143	7	1033	14994	-
CONCENTRACION MEDIA GR/L	1,2	0,8	8,7	0,5	0,4	1,9	0,08	3,3	0,6	0,07	-

Figura 6.10: Datos de los reconocimientos de los embalses principales de la cuenca del río Ebro (Fuente: Peña- CEDEX, 1996)

El total anual retenido, según esos datos, en los grandes embalses de la cuenca del río Ebro, sería (Tabla 6.1):



Embalse	Aportación sólida media retenida (hm³)	Porcentaje de arena	Volumen medio anual retenido de arena (m³)
Barasona	0,21	4,54	5.448
Sotonera	0,3	10,08	30.240
La Tranquera	0,01	14,44	1.444
Oliana	0,585	7,94	46.449
Yesa	0,79	4,02	31.758
TOTAL			115.339

Por tanto, solo en estos cinco de los grandes embalses del río Ebro se retienen 115.339 m³/año, cantidades a las que deben sumarse otras que se exponen a continuación.

En efecto, recientemente el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX ha realizado una Nota Técnica: “Plan de actuación para la mejora del régimen sedimentario en el ámbito del delta del Ebro. Nota Técnica Caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Mequinenza y Ribarroja y en el curso bajo del río Ebro (Tarea 2.1)” (apartado 3.1 del presente informe técnico), cuyo análisis y resumen se ha incluido en el capítulo 3 en cuyas conclusiones indican que:

- 1- La actual tasa de sedimentación del embalse de Mequinenza se estima en 4,36. 10⁶ t/año, equivalente a 3,87 hm³/año.
- 2- Los sondeos realizados entre los PK 72 y 90 en 2012 han permitido caracterizar el sedimento en este tramo de embalse. Se calcula que de los 40,2 hm³ de sedimento que existen en este tramo, 10,67 hm³ son de arena y 3,73 hm³ son de grava.

En la misma Nota Técnica se concluye (apartado 3.1.6 del presente informe técnico) que no se ha podido caracterizar el sedimento en el embalse de Ribarroja. Tampoco se tienen datos que lo permitan en el siguiente embalse de Flix, Por ello se necesitarían estudios que los caractericen. Finalmente, la Nota concluye que:

- En el presente informe se estima que en la actualidad (2020) la tasa de transporte de sedimentos en suspensión aguas abajo del complejo de embalses Mequinenza, Ribarroja y Flix es de 0,37. 10⁶ t/año (durante los primeros años de tras la puesta en explotación de las presas era de 0,83. 10⁶ t/año). Al igual que en el caso anterior, a estos valores habría que añadir los aportes de las cuencas del tramo bajo.

Estas cantidades son acordes con los datos de otros informes técnicos, analizados en el apartado 4.4.4 (Fuentes de sedimentos).

No obstante estas cantidades, se debe tener en cuenta que en general se encuentra mezclado con limos y arcillas, por lo que aparte de extraerlo de cada cuenco del embalse habría que hacer un tratamiento de limpieza y separación de arena cuya dificultad y complejidad de extracción se pone de manifiesto en un informe de la Confederación Hidrográfica del Ebro (apartado 3.3).

Si estas cantidades tuvieran que ser transportadas por tierra, la distancia aproximada que tendría que recorrer hasta Tortosa, de cada uno de los embalses la que se muestra en la Tabla 6.2.



Embalse	Distancia
Flix	65
Ribarroja	78
Mequinenza	100
Barasona	195
Sotonerá	216
La Tranquera	261
Oliana	204
Yesa	305

Por tanto, la cantidad de sedimento, arena y gravas, retenido por los embalses es muy grande. El problema se halla en la facilidad o dificultad de uso de estos materiales para disponerlos en el mar a disposición de su dinámica. Existen muy pocos trabajos que hayan analizado esta complejidad aparte del citado de la Confederación Hidrográfica de Ebro de abril pasado (CHE, 2020). En el año 2008, el CEDEX realizó un informe para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar, “Propuesta de embalse piloto para el aprovechamiento de sus sedimentos”, en la que no se llegó a resultados concluyentes, si bien, finalmente, se llegó a la conclusión que en general este aprovechamiento presentaba muchos problemas de índole práctica.

Por tanto, para poder tomar una decisión sobre el aprovechamiento del sedimento retenido en los embalses debe realizarse un estudio que contemple la viabilidad de su explotación como cantera de sedimento para las playas del Delta del Ebro, como indica CHE (2020), teniendo en cuenta al menos los aspectos técnicos siguientes:

- Estudio del embalse que contemple:
 - Datos volumétricos y/o sedimentológico.
 - Volumen de arena.
 - Volumen de aterramiento.
 - Dispersión de arenas.
 - Estimación de arenas en planta en cada embalse.
- Extracción:
 - Situación de la planta extractora.
 - Necesidad o no de planta clasificadora de material.
 - Zonas de acopio (dependiendo de la periodicidad de trasvase, etc.,)
 - Parques de maquinaria.
- Transporte:
 - Distancia a la costa (lugar de vertido).
 - Accesibilidad (De los puntos de extracción y vertido).
 - Gálibos, interferencia con el tráfico, impactos sobre la vía, etc.
 - Emisiones de CO₂ por camiones.
 - Efecto sobre la infraestructura viaria.
- Distribución:
 - Métodos de vertido
 - Lugar o lugares de vertido
 - Necesidad de plata fija de acopio, material, etc.



Otros aspectos que deben contemplarse son los efectos medioambientales de origen, transporte y destino, y las consecuencias y efectos sanitarios que pudieran producirse según la explotación de cada embalse.

6.3.1.2 Descompensación sedimentaria

Se produce, como se ha comentado en el apartado 4.1.2, a causa de que la desembocadura se encuentra dirigida hacia el norte, lo que hace que prácticamente nada de sedimento se incorpore al transporte sólido litoral en el hemidelta sur lo que incrementa el poder erosivo en las playas de Illa de Buda y Trabucador. En la Figura 6.11 (Callís et al., 1988) se muestra la diferencia de flujos de sedimento cuando la desembocadura estaba dirigida al este y en la actualidad; siendo ésta complementaria a las Figuras 4.7 a 4.9 de este informe.

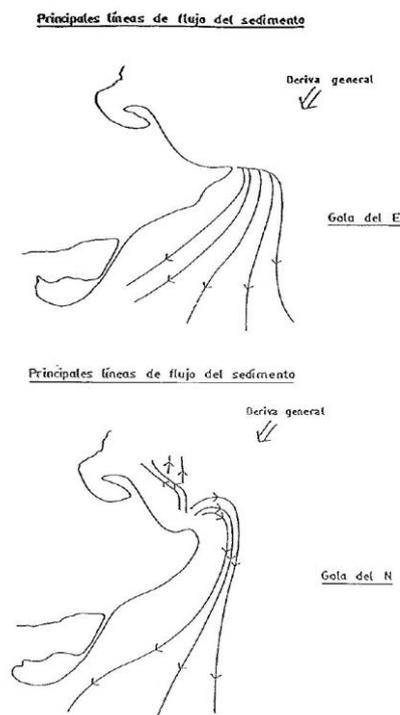


Figura 6.11: Diferencia de flujo de sedimentos con la desembocadura antigua, al este, y la actual al norte (Fuente: Callís et al., 1988)

Esta descompensación sedimentaria provoca dos efectos: El primero que la mayoría del sedimento se dirija hacia el hemidelta norte y el segundo que la parte de sedimento que el mar pueden impulsar hacia el sur, lo hacen en gran parte con la fracción más pequeña en suspensión; formando línea de flujo en ocasiones lejanas a la costa y por tanto sin incorporarse de manera clara al transporte longitudinal de sedimentos cercano a la costa. Esta situación se produce desde que se abrió la actual desembocadura, en 1937, y se cerró la antigua (Figuras 2.44 a 2.47) que se aprecia en las fotografías que se produjo permanentemente entre 1946 y 1957 (Figura 6.12).



Figura 6.12: Fotografía de 1956 en la que se aprecia el cierre de la desembocadura este y la fuerte apertura norte del río Ebro (Fuente: IH-UC, 2011)

Este cierre no obedeció a la reducción de caudal por regulación de la cuenca ya que en 1956, solamente eran cinco los grandes embalses en funcionamiento (Figura 6.10) con una capacidad solamente del 1,37% respecto a la que existía en 1987, sin tener en cuenta el embalse de Yesa, del que no proporciona datos la figura indicada. Por tanto este cierre debió obedecer a una situación anómala en la que predominase en la desembocadura la energía marina frente a la fluvial, esto es; en periodo de sequía. Así, en el “Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro” (2014) página 11 se lee:

“En el periodo oct/1913-sep/1935 los caudales mínimos registrados oscilan entre 34 m³/s (agosto) y 183 m³/s (febrero). En el periodo oct/1953-sep/1964 los caudales mínimos son notablemente menores debido a que es un periodo con un mayor consumo y una regulación creciente de agua en la cuenca, registrándose en Tortosa caudales mínimos de 9 m³/s (entre julio y octubre) y 200 m³/s (febrero).”

Los años considerados secos del siglo XX fueron: 1907, 1950, 1952, 1955, 1961, 1966, 1970, 1973 y 1998. Y los periodos o secuencias de sequías se produjeron en: 1909-14, 1938-39, 1944-45, 1963-64, 1978-84 y 1992-96.

Por tanto, el cambio de desembocadura del río Ebro puede achacarse a tres causas fundamentales:

1. Reducción del caudal del Río Ebro debido al incremento del consumo y sequías.
2. Reducción del caudal del Río Ebro debido a su regulación; especialmente a partir de 1966.
3. Estado límite del desarrollo del Cabo Tortosa respecto a batimetría.

Las consecuencias finales de esta alteración de la dirección de salida de la desembocadura son:

- La distribución del sedimento no obedece a la morfología previa a la transformación.
- Provoca un cambio en el desarrollo de las diversas partes del Delta.
- Es un elemento añadido a la falta de aportes sólidos del Río.

6.3.1.3 Falta de regulación y control de los sumideros y sus agentes

Es muy infrecuente que se analice las bahías del Fangar-L’Ampolla y de los Alfaques dentro del contexto del sistema litoral del Delta del Ebro. Especialmente importante en la bahía de

los Alfaques donde existen tanto presiones portuarias (Figura 4.65) como efectos de sumidero (apartado 4.1.3) que no se encuentra bien estudiado tanto en su capacidad y velocidad de llenado como en la cantidad y distribución granulométrica del material sólido que capta.

En similar situación se halla la bahía norte del Fangar-L'Ampolla donde no existen presiones portuarias aparentes, pero sí ha debido aumentar su velocidad de absorción de sedimento como consecuencia de la alteración de la desembocadura.

Esta falta de control y conocimiento del comportamiento de estas dos zonas hace que los valores del transporte de sedimentos en el sistema litoral no estén completamente integrados en la unidad fisiográfica, que por tanto podría carecer de un conocimiento exacto de su realidad.

6.3.1.4 Inundación de la plataforma deltaica

Se produce especialmente con los temporales junto con marea meteorológica y que la subida del nivel del mar prevista debido al cambio climático (capítulo 5) lo tiende a agravar (Figura 2.85). Son especialmente importantes en aquellas lagunas y humedales cercanos a la costa como laguna de la El Canal Vell, Illa de Buda, Alfacada, La Platjola, laguna de la Tancada y L'Encanyissada (Figura 6.13), y en las zonas bajas como en la playa de la Marquesa, Garxal y Riumar, la Barra del Trabucador y zonas interiores de la bahía de los Alfaques (Figura 2.105).

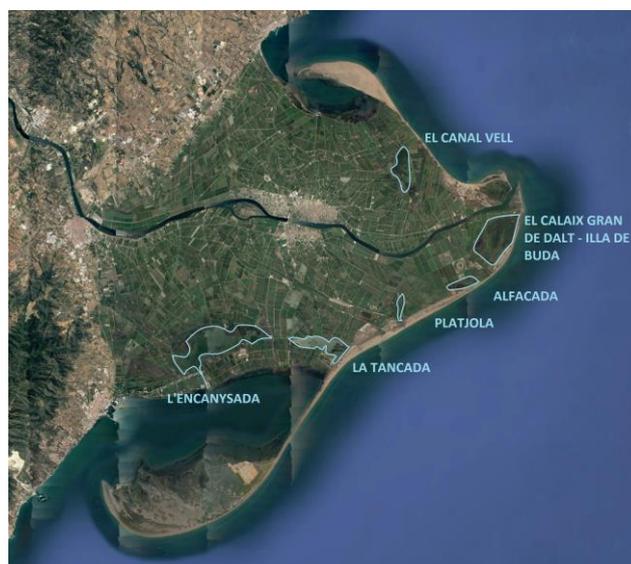


Figura 6.13: Situación de las principales lagunas y humedales cercanos a la costa del Delta del Ebro (Foto: Google Earth)

En la gran mayoría de los casos genera dos grandes problemas:

- Invasión de agua marina
- Captación de sedimento

En el primero de ellos (invasión de agua marina), suele ser temporal, pero todas ellas son lugares de una actividad avícola importante e interés medioambiental. Esta inundación

alcanza no solamente a las zonas lagunares y humedales, también lo hace en las zonas aledañas cultivables, salinizando el terreno, como sucedió en el temporal provocado por la borrasca Gloria en enero de 2020 (Figura 6.14). También la inundación de zonas bajas como son cordones litorales como la Barra del Trabucador, deja aisladas a zonas que como en el caso de la península de la Banya, alberga una explotación salinera

En el segundo de los casos, la captación de sedimento hace que se reduzcan los calados en los humedales con una tendencia al relleno y desecado, y sus efectos son acumulativos y constantes.



Figura 6.14: Efectos de la borrasca Gloria en la zona de la Alfacada e Illa de Buda el 23 de enero de 2020 (Foto: MITERD)

La pérdida de cota debido a la subida del nivel del mar (capítulo 5), agravada por la subsidencia de la plataforma deltaica, hace que gradualmente muchos terrenos con cotas relativamente aceptables para protegerse de la inundación marina, se encuentren en grave riesgo de inundación con mayor periodicidad y extensión (Figura 5.30).

6.3.2 Análisis de los problemas parciales

Todos ellos vienen bien definidos, delimitados y analizados en los trabajos del LIM (2000 y 2011) y se resumen a continuación.

6.3.2.1 Ordenación de las playas y sus servicios

En una gran parte se ciñen a las zonas de interés turístico, que a su vez se encuentran en situaciones erosivas. Suelen ser más debido a su acceso y movilidad que lo que generan como playa típica ya que al uso como tal se le une el atractivo medioambiental. Por ello repercute sus problemas en servicios asociados como aparcamientos o chiringuitos de playa, que deben ser compatibles con la protección y situación medioambiental del entorno

del Delta. Estos problemas se presentan, por tanto en la costa del hemidelta sur: Illa de Buda, La Platjola-La Tancada y Barra del Trabucador-Faro de la Banya; debiendo analizarlos para el hemidelta norte, por ejemplo en la zona de los Vascos en la playa de la Marquesa.

6.3.2.2 Ocupación urbana de la franja litoral más próxima al mar y humedales inundables

Son relativamente escasos los núcleos urbanos próximos a la franja litoral del sistema litoral del Delta (Figura 6.15).



Figura 6.15: Núcleos urbanizados en el sistema litoral del Delta del Ebro

En el propio frente deltaico se hallan junto a la playa de la Marquesa y Garxal (Riumar), cerca de la bahía del Fangar (L'Ampolla) o en la franja costera entre la Platjola y Tancada (Eucaliptus). Dentro de la bahía de los Alfaques, junto a L'Encanyissada se halla Poble Nou del Delta, algo separado de la costa y Sant Carles de la Rápita con el puerto, único que puede considerarse afectando directamente al sistema litoral del Delta del Ebro, junto al cargadero de Alcanar.

El informe del LIM-UB (2000) incidía en los potenciales problemas de estas zonas urbanas y la necesidad de una regulación respecto a su entorno, teniendo en cuenta el posible

impacto que éstos, especialmente Eucaliptus y Riumar, pueden tener sobre las zonas lagunares y humedales de su entorno.

6.3.2.3 Ocupaciones agrarias

Las ocupaciones agrarias no son en sí ningún problema, más bien son las afectadas por diversos problemas. Se sitúan en una gran parte de la llanura deltaica, especialmente arrozales (un 65%), y su uso pueden verse afectados por las transformaciones que se produzcan y, a su vez, pueden ejercer de elemento de presión sobre la libre evolución de las playas.

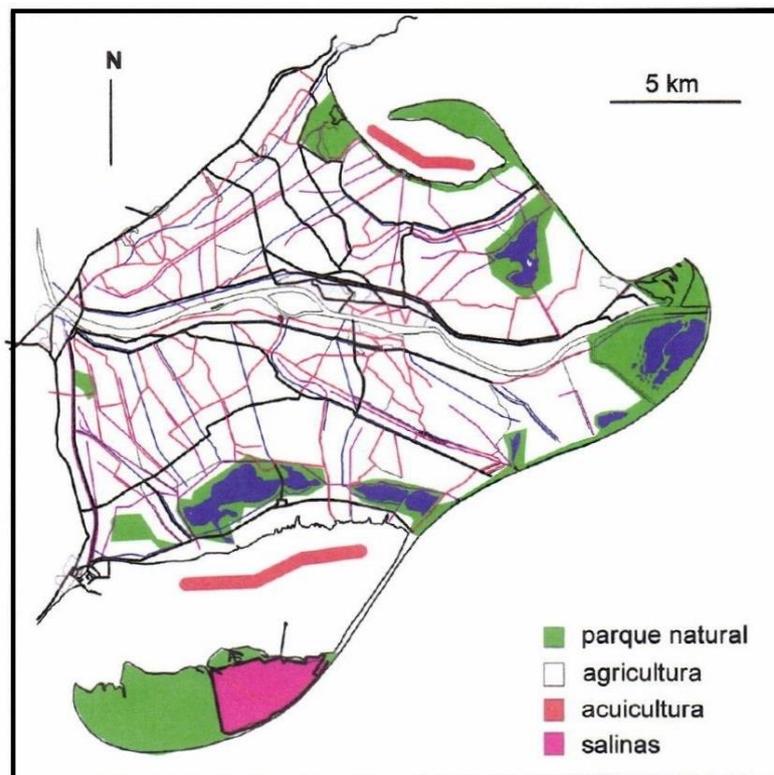


Figura 6.16: Mapa de usos del suelo de 1997 del Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya (2000) (Fuente: LIM-UB, 2000)

La actividad agrícola tiene una doble vertiente del problema, como se acaba de indicar: Por una parte la explotación agraria, arrozales en su mayoría, hace de fijación del terreno, que se tiende a concebir como un elemento estático, por lo que todo movimiento o transformación se puede considerar como un problema añadido a ese uso. Esa idea choca con la propia definición de un delta, expuesta al comienzo de este capítulo, que nace como un elemento dinámico sedimentario de puente entre el río y la costa, siendo estas transformaciones lentas o rápidas dependiendo de las variables presentes en ellas.

Por otra parte, el sistema de cultivo y explotación agraria se ve afectado tanto por la inestabilidad de los contornos o fronteras naturales, como por las transformaciones debidas al cambio climático, que hace subir el nivel del mar. Esto, unido a la subsidencia del propio delta, que puede estimarse en un rango de 3 mm/año (Maldonado, 1972) a 3,5 mm/año

(Sánchez-Arcilla, 1993), hacen que las zonas potencialmente inundables de la llanura deltaica (Figuras 2.4, 2.36, 2.37, 2.38 y 2.84) vayan creciendo con el tiempo.

A ello hay que añadir el efecto de salinidad del terreno, estudiado por el IRTA (instituto de investigación de la Generalitat de Catalunya adscrito al Departamento de Agricultura, Ganadería, Pesca, Alimentación y Medio Natural) que evalúa una pérdida de productividad de arroz en un 10% con una subida del nivel del mar de 0,73 m (Figura 6.17)

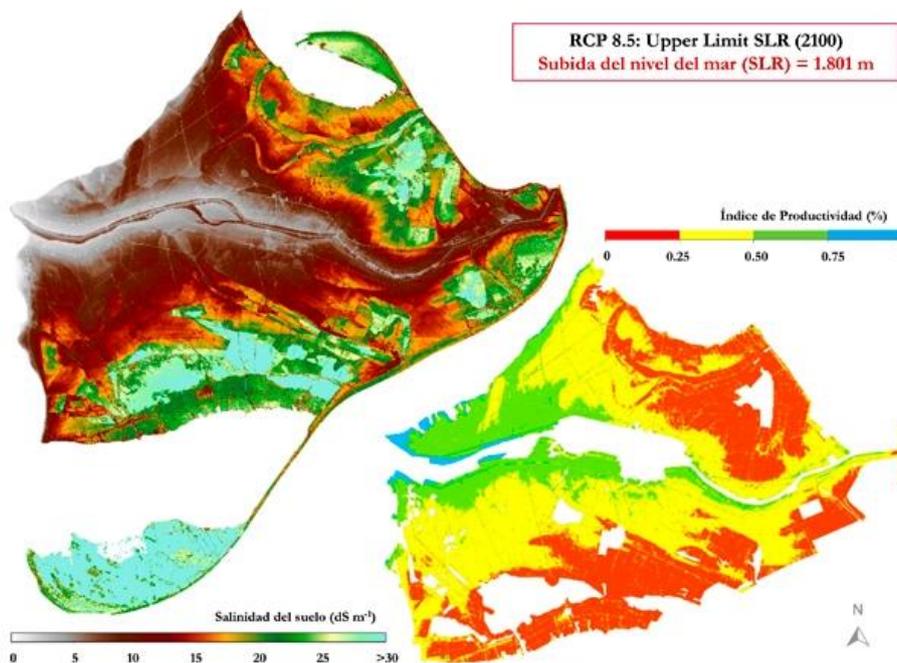


Figura 6.17: Transformaciones en la capacidad productiva del terreno debido al cambio climático en el Delta del Ebro según el IRTA (Fuente: www.iagua.es)

6.3.2.4 Ocupación de actividad salinera en la península de la Banyà

Las salinas de la Trinidad son unas de las primeras explotaciones ubicadas en el Delta y su ubicación actual procede de comienzos del siglo XX. Tienen un valor cultural y económico importante; si bien, el problema radica en dos puntos: El primero de ellos es similar al indicado en el punto anterior respecto de las explotaciones agrícolas, y es que su ubicación responde a una concepción estática del territorio, cuando un delta intrínsecamente no es así. Esta circunstancia hace que la erosión que se va produciendo en la zona norte de la península de la Banyà alcance a los diques de la salinera, como lo han indicado reiteradamente los estudios del LIM (2000 y 2011) y que se han ido teniendo que retranquear (Figura 6.18) y aun así los actuales están cerca de topar con la playa.



Figura 6.18: Líneas de diques de las salinas Trinidad en la península de la Banya en 2004 (en amarillo) y 2017 (Foto: Google Earth)

El segundo corresponde con los servicios esenciales que necesita esta explotación como son una vía de transporte y un tendido eléctrico, que históricamente han ido por la Barra del Trabucador. La línea eléctrica que antiguamente iba en postes a lo largo de la Barra del Trabucador (Figura 4.67) se retiró en agosto de 2016 entrando en funcionamiento el tendido eléctrico subterráneo. El camino de acceso a las salinas a lo largo de la Barra del Trabucador se ve cortado y sin acceso a las instalaciones cuando ésta se rompe; como ejemplo, a lo largo de 2020 se ha visto aislada al menos tres veces, en enero, marzo y abril.

6.3.2.5 Vertido de fangos orgánicos

Este problema es propiamente medioambiental y es debido a los desagües provenientes del drenaje de la llanura deltaica y de su actividad agraria, que producen estados de eutrofización de las bahías del Fangar y los Alfaques, como indica claramente el estudio del LIM-UB (2000)

La calidad de las aguas de la bahía del Fangar se ha estudiado recientemente (Samper Garcia, 2019) en el que se indica textualmente que “a pesar de que estos aportes de agua representan menos del 5% de lo que el río aporta al mar, gracias al confinamiento y al efecto del estuario, las bahías alcanzan niveles de producción biológicas 10 veces superiores, por unidad de volumen, a las del mar circundante. Esto se debe al equilibrio existente entre los aportes nutritivos del agua procedente del riego y la tasa de renovación del agua, es decir, el tiempo que residen estos nutrientes en la bahía antes de salir al mar”.

La red de drenaje de esta bahía y la aldea de L’Ampolla se realiza mediante tres estaciones de bombeo (Figura 6.19), dos situadas dentro de la bahía del Fangar, Illa del Mar y Trastellador, y otra en la de la Ampolla, Bassa d’Olles.



Figura 6.19: Estaciones de bombeo de agua procedente del drenaje de la llanura deltaica de Ebro
(Fuente: Samper Garcia, 2019)

No obstante, el trabajo del LIM-UB (2000) es contundente en el análisis del problema: “Los orígenes y las características de esta problemática hacen prácticamente imposible que esta se resuelva por sí sola sin la intervención humana [...] se pueden destacar entre otros factores el progresivo estrechamiento de la bocana de la bahía por el crecimiento hacia tierra de la Punta del Fangar [...] la progresiva acumulación de fangos reductores procedentes de los drenajes de los arrozales, la pérdida de profundidad de la bahía por el depósito tanto de fangos provenientes de la plana deltaica como de sedimento de la costa exterior y el consecuente incremento de la temperatura de las aguas.”

Los mismos problemas se repiten en la bahía de los Alfaques, al sur del Delta; si bien, su gran extensión y mayor abertura al mar hacen que estos se diluyan algo más, aunque la presión portuaria, apuntada en el apartado 4.6.3 (Figura 4.65) hacen que las dimensiones del problema no solamente sean de índole medioambiental.

6.3.2.6 Estado medioambiental de las lagunas

Las presiones tanto de intrusión salina como de actividad agraria o urbana, hacen tender a las lagunas y humedales costeros de la planicie deltaica hacia un deterioro medioambiental; como sucede en la Illa de Buda, la Alfacada, la Platjola, Tancada y la Encanyissada (Figura 6.13).

La problemática de todas ellas se resumen en tres puntos: presión urbana, agrícola e intrusión marina tanto de agua salada como el retroceso que se produce de la costa. Pero, para cada una de ellas el grado de estas presiones varía.

Comenzando con la Illa de Buda, al ser de gran superficie y el cordón litoral estrecho su comportamiento es perfectamente igual que una laguna litoral clásica. La cercanía del Cabo Tortosa y falta de sedimentos aportados por el río en el hemidelta sur hace que la fuente principal de arenas sea este cabo, lo que hace debilitar a toda la costa de su entorno

próximo; reduciéndose cada vez más la anchura del cordón litoral. A su vez, la acción del oleaje perpendicular y subida del nivel del mar hacen emigrar con el tiempo el cordón hacia el interior (capítulo 5). Ambas acciones hacen que, en eventos como temporales con un cierto nivel de marea meteorológica, el cordón se rompa y permite la intrusión salina y de sedimentos en la laguna, como ha sucedido recientemente con la borrasca Gloria (enero de 2020) (Figura 6.20). En estas condiciones el sedimento se introduce en ella y hace inevitable que se vaya colmatando la laguna, reduciendo sus calados y superficie.

En el pasado, esta laguna ha sido objeto de actuaciones (Moliner Coll, 2006) en el que se realizó un “Proyecto de Restauración y Gestión integrada de la Illa de Buda” entre cuyos objetivos se encontraban evitar la eutrofización de la laguna; para ello se instalaron equipos de control de flujo de agua desde los desagües de los arrozales a ella.



Figura 6.20: Desembocadura de la gola Mitjorn y al fondo Illa de Buda, completamente rebasada por la acción del mar (Foto: MITERD)

También se han hecho trabajos con propuestas de restauración de otras lagunas litorales como la Alfacada (Calvo y López, 2010).

Las lagunas de la Platjola y Tancada se encuentran en una zona del litoral, Eucaliptus, con tendencia a aumentar su ancho, lo que hace que su presión sea mayor desde las otras dos presiones: urbana y agrícola. El trabajo del LIM-UB (2000) aprecia en esta zona tres problemas:

- Pérdida de zonas húmedas costeras de valor natural debido a su ocupación y construcción de obras
- Ocupación no regulada por parte de vehículos y usuarios de la parte posterior de la Playa de los Eucaliptus



- Riesgo de inundaciones ocasionales de zonas cultivadas próximas a la laguna de la Tancada durante la acción de temporales

Entrando la primera y tercera dentro de este epígrafe mientras que la segunda sería un problema de ordenación de la playa, ya tratado.

6.3.2.7 Degradación ecológica de las bahías y presión sobre ellas

La degradación ecológica de las bahías del Fangar-Ampolla y los Alfaques (LIM, 2000) hace que sus aguas se encuentren cada vez en peor estado. Este problema es especialmente importante en la bahía del Fangar, donde su tendencia al cierre hace que tenga una predisposición mayor y a mayor velocidad a alcanzar un estado medioambiental de degradación.

En la Figura 6.21 se muestra la reducción aproximada que se ha ido produciendo de la distancia desde la Punta del Fangar a tierra, medido en la serie de fotografías de Google Earth tomadas desde 2004.

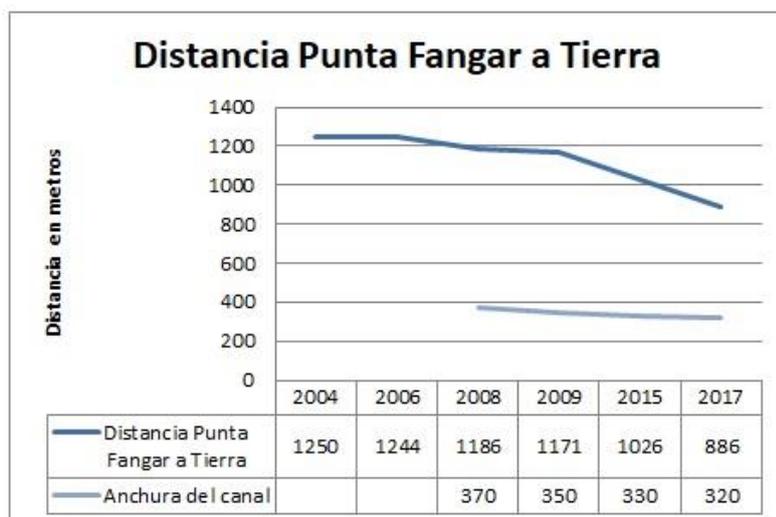


Figura 6.21: Distancia aproximada de la Punta del Fangar a tierra

6.4 ALTERNATIVAS DE ACTUACIÓN SEGÚN EL TIPO DE PROBLEMA

Como se han ido viendo al analizar el tipo de problemas, globales y parciales, que se producen en el litoral del Delta del Ebro, todos ellos, ya sean de índole global o parcial, están interrelacionados. Es por ello que las alternativas de actuación deben analizarse desde esta perspectiva global y entrecruzada. Las alternativas de actuación que se presentan no tienen que ser excluyentes, pudiendo combinarse para una mayor eficacia de lo que se requiere.

6.4.1 Alternativas de actuaciones globales

Para abordar las diferentes alternativas que se poseen para solucionar los problemas globales se ha optado por aplicar dos criterios:



- 1- Seguir las opciones generales dadas en el apartado 6.2 sobre tipo de actuaciones; considerando tres alternativas generales posibles:
 - a. Acomodación:
 - i. Evolución controlada mediante actuaciones costeras
 - ii. Revirtiendo los procesos
 - b. Protección frente a las transformaciones del medio y agentes:
 - i. Rigidizando
 - c. Retirada paulatina y ordenada:
 - i. Reubicando actividades dejando que los procesos y medios actúen libremente
- 2- Para cualquiera de los casos (acomodación o protección) se necesita una subida efectiva de la berma o cota de la estructura que compense la subida del nivel del mar y la subsidencia en, al menos, la vida útil de la obra. Así, suponiendo una vida útil de 50 años y una elevación del NMM de 0,5 m, con una subsidencia de 3 mm/año (Maldonado, 1972), entonces el incremento de cota sería $\Delta B = 0,65$ m, a lo que podría sumarse un margen de seguridad para tener en cuenta las incertidumbres en los datos empleados.

Las alternativas de actuación generales que se tienen de los problemas generales enumerados en el apartado 6.3 son:

6.4.1.1 Alternativas de actuación ante la falta de aportes sedimentarios del río Ebro

Para enfrentarse con el problema de la escasez de sedimentos aportados por el río Ebro al mar e incorporarse a la dinámica litoral se puede recurrir a las tres estrategias indicadas anteriormente:

ACOMODACIÓN

La acomodación podría realizarse por tres vías diferentes:

- I- Solucionar el problema volviendo a que el río lo aporte: Para ello se tienen dos hipotéticas vías.
 - a. La primera de ellas, sería tomarla de los embalses donde quedan retenidas una cantidad importante de sedimento; teniendo en cuenta los condicionantes indicados en los apartados 3.3 y 6.4.1.1. La aportación por esta vía puede ser anual o con menor periodicidad al objeto de optimizar todas las variables relacionadas con ella, esbozadas en los apartados anteriores.
 - b. Buscar un yacimiento terrestre o marino con arena de características similares y realizar una aportación anual o con mayor periodicidad que compense el déficit sedimentario en el exterior del Delta, que sería el volumen medio anual que va parar a los sumideros (apartados 4.1.3 y 4.6). Así mismo debe tenerse en cuenta lo apuntado en el apartado 6.4.1.1.
- II- Revertir el proceso natural de transporte: Extrayendo la arena de los sumideros costeros y revertiéndola hacia las zonas de donde proceden, esto es hacer una gestión del sedimento en todo el sistema litoral. Ello se podría directamente



desde los sumideros (globalmente) o desde zonas de paso, o zonas intermedias; asimismo puede realizarse mediante obras de captación:

- a. La gestión del sedimento desde zonas intermedias tiene una doble ventaja y es que la gestión del sedimento se puede hacer en tiempos diferentes según zona y la distancia a transportar la arena es menor. El inconveniente principal es que extraer arena de una playa para llevarla a otro lugar no suele estar socialmente bien visto y debe ser explicado suficientemente bien a los usuarios.
 - b. La extracción directa desde los sumideros, Fangar y Alfaques, tienen muchos inconvenientes: Figuras de protección, mezcla con fangos, captación y extracción de dragados portuarios de mantenimiento, etc. Ante esto, puede pensarse en acciones para captar la arena justo antes de entrar en ellos mediante planes, obras de captación etc. Y en todo caso un seguimiento anual tanto de su evolución, como de la distribución y tipo de sedimento confinados en ellos.
- III- Adaptar la costa a la evolución esperada de las playas. Debe tenerse en cuenta que esta medida podría situarse dentro del apartado dedicado a la retirada; pero la diferencia es que se tendría que adaptarse las franjas costeras para que existiese un libre movimiento (LIM, 2011) y elevando la cota de la berma para evitar rebases e inundaciones. Es posible que esta medida llevase aparejada la compra de terrenos y reubicación de actividades.

PROTECCIÓN

El objetivo de este tipo de actuaciones es priorizar el mantenimiento de la superficie y actividad del Delta; y para ello lo que se intenta es ralentizar o detener el movimiento natural del Delta. Esto se podría realizar mediante dos tipos actuaciones:

- I- Reducción de la dinámica litoral de todo el frente deltaico y esto se realizaría mediante obras clásicas de defensa de costa, especialmente: espigones y diques exentos. Ejemplo de ello aparece en los primeros trabajos del Delta de los años 90 del pasado siglo (apartado 6.3.2). El grado de ralentización en la dinámica sedimentaria dependerá del diseño y robustez de las obras. Así mismo; el uso recreativo como playa y el mantenimiento de humedales debe ser compatible con la solución dada en cada caso.
- II- Rigidización del frente costero del Delta, que dependiendo del tipo de obra a realizar y la protección a dar pudiera ser: Longitudinal o transversal, y total o parcial.
 - a. La protección longitudinal supone la creación de una obra de defensa a lo largo de la plataforma deltaica que no permita movimientos significativos de la costa ni longitudinal ni transversalmente. Esta solución, coloquialmente conocida como "holandesa" (apartado 6.3.2) precisaría de un mantenimiento específico similar a las obras portuarias y desaparecería en gran medida el objetivo lúdico de la playa y hasta ésta misma, salvo que se cree una playa artificial delante del dique que requeriría mantenimiento y recarga artificial periódica.



- b. La protección transversal tiene muchas alternativas y componentes. Para que sea una verdadera rigidización, las obras, espigones o dique exentos tienen que garantizar que el frente de costa se encuentre estático y en equilibrio; pudiendo añadir una protección longitudinal si fuese necesario para evitar los rebases a la plataforma deltaica.
- c. Pero, tanto la protección longitudinal como la transversal pueden ser totales, esto es; abarcar a toda la superficie del Delta, o parcial; rigidizando la plataforma deltaica y dando otro tratamiento a los lóbulos o penínsulas del Fangar y los Alfaques. Esta última de las opciones es la más extendida por los defensores de este tipo de actuación en la actualidad.

En todos los casos, la opción de este tipo de actuaciones lleva aparejado el estudio y realización de planes de drenaje y de los humedales de toda la llanura deltaica.

RETIRADA

La retirada estratégica supone una aceptación implícita de la evolución natural del Delta, pero también se deja a los demás agentes transformadores no naturales que sigan actuando como hasta el momento presente. Por ello, puede haber un punto intermedio entre la retirada y la acomodación, como se ha indicado en el apartado dedicado a la Acomodación.

La retirada puede efectuarse de dos maneras diferentes:

- I- La retirada global supone la realización de un Plan progresivo de abandono de áreas de cultivo y explotación agraria. Esto conlleva una negociación con los propietarios y afectados que encuadren las expropiaciones, indemnizaciones y reubicación de actividades. El plan indicado debe contener fases de retirada dependiendo del estado de deterioro e invasión marina en que se encuentre, que dependerá en un grado importante de la subida del nivel del mar, con las transformaciones e impactos correspondientes de los agentes climáticos.
- II- La retirada parcial supone el abandono no de todo el delta, sino de determinados lugares. Esto supone que se decida actuar de manera diferente en un lugar y otro del conjunto.

Debe tenerse en cuenta que la retirada y abandono de un lugar puede llevar aparejado la aparición de nuevos problemas. A modo de ejemplo, si se cierra definitivamente la bahía del Fangar y se sigue vertiendo a ella fangos y materia orgánica se puede acelerar el deterioro de sus aguas, con los problemas de salubridad y medioambientales que puede llevar aparejado.

6.4.1.2 Alternativa de actuación ante la descompensación sedimentaria en la distribución de los aportes del río Ebro

Al problema de la escasez de sedimentos aportados por el río Ebro se le añade que éstos no se distribuyen de manera equilibrada, con una mayor distribución hacia el hemidelta norte; este desequilibrio ha aparecido después que se constituyese el delta y se desarrollase hasta la forma que tiene actualmente (apartados 4.1.2 y 6.4.1.2), por lo que se produce un desequilibrio en la distribución histórica de sedimentos a lo largo de las costas del Delta, lo que provoca un agravamiento en el problema analizado en el apartado anterior. Para



enfrentarse a este problema se puede recurrir, según las tres estrategias indicadas anteriormente, a:

ACOMODACIÓN

La acomodación a esa descompensación en la distribución del sedimento podría efectuarse de tres maneras:

- I- Dejando que evolucione el Delta y llegado el caso tomar medidas para paliar sus consecuencias, que podrían ser:
 - a. Cuando cuando esté próximo el cierre de la bahía del Fangar se pueden construir unos diques de encauzamiento para crear una gola artificial y, si fuese necesario realizar bombeos para la renovación del agua de la bahía. También, posiblemente sería necesario construir un colector que recogiese el agua del drenaje de la llanura deltaica para expulsarlo fuera de la bahía, evitando así un incremento de la degradación.
 - b. La falta de aportes podría dar lugar a la rotura permanente de la Barra del Trabucador, con la consiguiente erosión y aislamiento de la península de la Banya.
- II- Revertir la descompensación; introduciendo un trasvase de sedimento desde el hemidelta norte hacia el sur, dentro de la acción continuada de mantenimiento o gestión del sedimento.
- III- Realizar un estudio en profundidad de la actual desembocadura para abrir una nueva salida en la zona sur para que así el sedimento pueda repartirse. Hay que tener en cuenta que no podría o no debería reducirse la velocidad actual de desagüe porque si no se tendería a cerrar una de las bocas.

PROTECCIÓN

Las medidas a adoptar si se elige como opción la protección de la costa actual serían un complemento, con consecuencias similares y agravadas indicadas en el apartado anterior. Por lo que las alternativas de actuación que se disponen son de la misma índole que aquellas, esto es:

- I- Reducción de la intensidad de la dinámica litoral, utilizando obras de defensa (espigones o diques exentos) en todo el frente costero del Delta; realización de unos diques de encauzamiento en la desembocadura del río, desviando ésta a la antigua salida.
- II- Rigidización completa de la plataforma o llanura deltaica, bien sea mediante espigones o diques exentos, con o sin dique longitudinal y la realización de unos diques de encauzamiento en la desembocadura del río, desviando ésta a la antigua salida.

RETIRADA



Al igual que se ha dicho en el apartado anterior, la retirada estratégica supone una aceptación implícita de la evolución natural del Delta; pero también se deja a los demás agentes transformadores no naturales que sigan actuando como hasta el momento presente y por tanto se deja que continúe la descompensación en la distribución del sedimento a lo largo de los hemideltas norte y sur. También, puede haber un punto intermedio entre la retirada y la acomodación, como se ha indicado en el apartado anterior dedicado a ella.

La estrategia de retirada es similar a la indicada en el apartado anterior, dado que no se realizan medidas distintas y se permite la libre evolución asumiendo en ella la descompensación en la aportación de sedimento. Por tanto, se remite a él para las medidas (globales o parciales) que se pueden realizar para la retirada.

6.4.1.3 Alternativa de actuación ante la falta de control y regulación de los sumideros y agentes actuantes en ellos

Realmente, la falta de control, tanto de lo que está pasando en el interior de las bahías como en los agentes actuantes en ellas, pertenecen más a la necesidad o no del conocimiento de datos en el sistema litoral del Delta del Ebro. Por tanto no se puede tratar de la misma manera que los problemas anteriores, salvo que dentro de este concepto entre la colmatación de estos sumideros, bahías.

Desde el primero de los criterios, control de datos, sería aconsejable conocer todas las variables que entran en juego en cada uno de los sumideros, en especial el llenado y distribución por tipos y características de sedimentos. Su objetivo sería conocer la tasa de sedimentación de ellos, y determinar la correlación entre la cantidad de sedimentos que sale anualmente del río con las tasas de transporte que se supone existen y con ello cerrar el círculo completo del movimiento sedimentario para tener un balance sedimentario del sistema litoral lo más exacto posible.

El segundo de los criterios sí puede suponer una actuación (acomodación, protección o retirada) costera precisa. Pudiendo especificarse según la bahía, y vienen detallados en las dos alternativas anteriores (Falta y descompensación de aportes), salvo en el caso de las presiones portuarias de los Alfaques (apartado 4.3.4.2 y Figura 4.65) que, pudieran evitarse mediante:

- I- Estructura de defensa de control en la punta de la Banya que retenga el sedimento proveniente de la zona norte con el fin de realizar un trasvase que devuelva el material a su origen. Con esta estructura se evitaría en gran medida que el sedimento transportado por arrastre o suspensión próxima supere esa punta y pueda ser captado por el canal de acceso al cargadero de Alcanar o se introduzca en la bahía.
- II- El trasvase continuado desde la punta de la Banya hacia el cabo Tortosa podría robustecer la Barra del Trabucador, evitando su rebase y reduciendo la cantidad de sedimento que anualmente se incorpora a la bahía atravesándolo (apartado 4.3.3 y Figura 4.56).

La acción para reducir el llenado de la bahía del Fangar podría resumirse en dos puntos muy específicos:



- I- Evitar que entre material en la bahía del Fangar-L'Ampolla; que podría realizarse, al igual que se ha indicado para los Alfaques, mediante una obra de defensa de control y retención de sedimento, que serviría como área de depósito para alimentar un trasvase hacia el este, Riumar y Marquesa, y un trasvase hacia el hemidelta sur depositándolo al norte de la Illa de Buda.
- II- Si se opta por no realizar acción alguna de gestión del sedimento; pero no se quiere que desaparezca la bahía, la única opción es conectarla al mar mediante una gola artificial protegida por unos diques de encauzamiento cuando llegue el caso, como se ha indicado en los apartados anteriores.

6.4.1.4 Alternativas de actuación contra la inundación de la plataforma deltaica

La inundación de la plataforma deltaica debido a la acción del mar (elevaciones del nivel del mar debido al oleaje, viento, mareas de presión y astronómica, y subida del nivel del mar) y a la subsidencia que va produciéndose en los estratos que forman la plataforma deltaica, se ha tenido en cuenta en las alternativas de actuación de los tres problemas globales considerados anteriormente. Además, se ha considerado en todos los casos el efecto del cambio relativo de la tierra deltaica respecto al nivel del mar (Figura 5.30 y Tabla 5.2).

Por ello solamente se contemplan actuaciones complementarias a éstas y específicas de la inundación, siendo éstas:

- I- Capacidad de desagüe de zonas de drenaje que deben adaptarse a la nueva cota y caudales a drenar y extraer.
- II- Control de los canales interiores de desagüe para que mantengan la capacidad de caudal que pueden transportar.
- III- Control de la cota de las bermas de todo el contorno del Delta para que mantenga una altura diferencial respecto al mar en situaciones extremas de tal manera que solamente se admita un determinado porcentaje de rebases.
- IV- Las inundaciones pueden producir movimiento de sedimentos hacia las zonas humedales especialmente litorales (Figura 6.13) que pueden verse afectadas reduciendo tanto su profundidad como su extensión; por lo que deben existir planes de contingencia que lo contemplen con diferentes alternativas como puede ser su dragado y limpieza, o reperfilado del trasdós.

6.4.2 Alternativas de actuaciones parciales

No corresponden a este Plan dar alternativas de actuación para los problemas que se han enumerado y categorizado como parciales en el apartado 6.3.2, ya que en su gran mayoría incumben a otro ámbito no contemplado; si bien, sus problemas afectan a todo el ámbito del sistema litoral. En conjunto se pueden observar dos tipos de problemas parciales: 1) los que corresponden a ocupaciones o presiones sobre el territorio y el dominio público marítimo terrestre; 2) aquellos que afectan a la calidad de medioambiente.

Alternativas de actuación sobre los problemas de ocupaciones o presiones sobre el territorio se analizan en dos contextos diferentes: Urbano y agrario.

La ordenación de las playas y sus servicios son simples elementos auxiliares en los que sus alternativas de actuación dependen más de la actividad turístico recreativa que se quiera promocionar que de la propia evolución, que en todo momento puede adaptarse a ésta al ser los elementos que la componen flexibles.

6.4.2.1 Alternativas de actuación sobre problemas urbanos

Una llanura deltaica, por su propia naturaleza es inestable y tiene una gran capacidad de variar y transformarse. Por ello, no es un lugar apropiado para un asentamiento estable; especialmente en aquellas zonas más próximas al mar donde los cambios y fluctuaciones son rápidos y activos; no pudiendo considerar estas zonas como fijas, estables ni estáticas, sino todo lo contrario. En esta situación se encuentran tres enclaves urbanos (Figura 6.15):

- Riumar: Situada junto a la desembocadura; donde un colapso o transformación brusco de ella puede afectarle significativamente (Figura 6.22).
- Eucaliptus: Situado justo al sur de la gola de la laguna de la Platjola (Figura 6.23), que tiene la ventaja de que se sitúa frente a una costa en aumento; pero puede ejercer presión sobre lagunas y humedales litorales próximos.
- Poblenou del Delta: Situado en la zona sur del delta, junto a la laguna de L'Encanyissada. Se halla algo alejada de la costa, en el litoral de la bahía de los Alfaques (Figura 6.24).

También dentro de la llanura deltaica se encuentran Els Muntells y Deltebre, que ocupa una gran extensión a lo largo del cauce bajo del Río. Pero, solamente se entrará a valorar las alternativas de actuación de aquellas zonas situadas en el borde del Dominio Público Marítimo Terrestre (DPMT) y de la Servidumbre de protección.

En los tres casos, las alternativas de actuación que se pueden contemplar, siguiendo el criterio indicado al comienzo de este apartado 6.4, son:

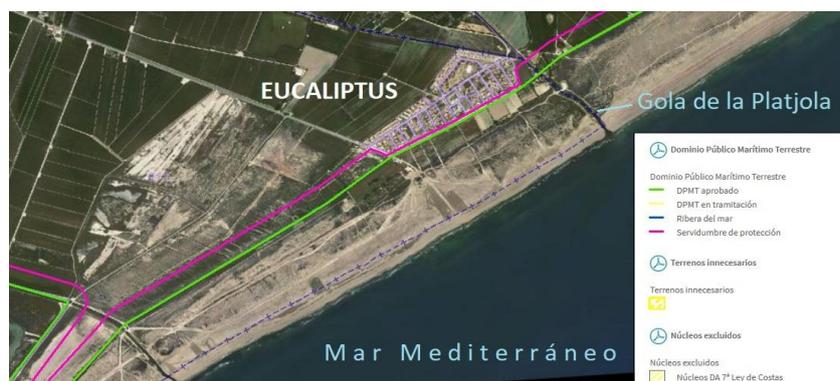


Figura 6.22: Zona de Riumar y definición del DPMT y Servidumbre de Paso (Fuente: MITERD)



CEDEX



Figura 6.23: Zona de Eucaliptus y definición del DPMT y Servidumbre de Paso (Fuente: MITERD)



Figura 6.24: Zona de Poblenou del Delta y definición del DPMT y Servidumbre de Paso (Fuente: MITERD)

ACOMODACIÓN

Para cada uno de los casos requiere que la zona urbana se adapte lo mejor posible a las situaciones que pueden suceder debido a los efectos no solamente del cambio climático sino de las acciones emprendidas para contrarrestar los efectos de los problemas globales. La acomodación se puede realizar mediante los mecanismos generales siguientes:

- I- No realizar un aumento de la zona urbana
- II- Crear una franja de defensa libre frente al mar que permita el movimiento natural y esperado con las actuaciones globales adoptadas, y frente a la zona de



humedales (Garxal en Riumar, Platjola en Eucaliptus, y L'Encanyissada en Poblenu del Delta).

- III- Planes urbanísticos que limiten el desarrollo urbano o hasta la retirada urbana parcial.

PROTECCIÓN

El objetivo de esta acción es fijarse al terreno para ello la acción dependerá también de la evolución que se vaya produciendo en el entorno litoral. Si se llegase a necesitar la defensa del frente costero mediante obras rígidas de defensa (espigones o diques) tendría que evaluarse el efecto que puede producir en el entorno estas acciones y cómo afectaría en el devenir de la propia zona urbana y los objetivos perseguidos por ella.

RETIRADA

La retirada puede ser parcial, a medida que las zonas urbanas se encuentren en un riesgo severo, o total ya que dado que determinadas zonas, Eucaliptus principalmente, su extensión no es muy grande, la retirada parcial podría no tener sentido práctico.

6.4.2.2 Alternativas de actuación sobre problemas de ocupaciones agrarias

Las ocupaciones agrarias, que son una gran parte de la llanura deltaica, poseen dos grandes problemas: el debido a la inundación de la plataforma deltaica, y la erosión costera y transformación morfológica del Delta. En ambos casos las alternativas de actuación que se tiene se encuentran ya estudiadas en los problemas globales indicados (apartado 6.4.1).

6.4.2.3 Alternativas de actuación sobre el problema de ocupación de actividad salinera en la península de la Banyà

Al igual que se ha indicado en el apartado anterior respecto al uso agrario de terrenos de la plataforma deltaica, se puede decir de la actividad salinera de la península de la Banyà (Salinas de la Trinidad). Las alternativas a ella vienen condicionadas por las acciones globales que se emprendan y por tanto no pueden definirse unas alternativas claras porque éstas estarían condicionadas.

No obstante, solamente se vislumbran tres alternativas si no se emprendiese ninguna acción global:

ACOMODACIÓN

Que sería la situación que se ha ido viviendo en los últimos tiempos en ella, como se ha descrito al tratar de su problema (apartado 6.3.2.4). Con retiradas parciales y refuerzo de las estructuras de defensa.

PROTECCIÓN

Mediante acciones más severas sin realizar retiradas, lo que llevaría en el estado presente a una situación de rigidización de un tramo de costa.



RETIRADA

Que supondría el abandono de esa actividad en ese lugar; trasladándose a otro o dejando la actividad económica. En el primero de los casos supondría un coste económico importante y en el segundo, además un coste social aún más importante.

6.4.2.4 Alternativas de actuación sobre los problemas de calidad del medioambiente

Que englobaría tanto los vertidos de fangos orgánicos como el estado medioambiental de las lagunas y la degradación ecológica de las bahías y presión sobre ellas. Las alternativas de actuación para mitigar estos problemas que afectan a la franja litoral son en su mayoría de gestión de residuos provenientes de la actividad agrícola. Sus soluciones deben tender a un vertido cero de fangos a las bahías.

Ejemplo de ello son los llamados “humedales de decantación” que son un sustituto de las depuradoras tradicionales. Existen dos en la actualidad en el Delta, construidos por Acuamed e inaugurados en 2015: El de Illa de Mar en el hemidelta norte en Amposta, el de Embut en el hemidelta sur en Deltebre (Figura 6.25)



Figura 6.25: Humedales de decantación, filtros verdes, del Delta del Ebro en Illa del Mar al norte y Embut al sur (Foto: Google Earth)

Aunque existen en la actualidad tres estaciones de bombeo primarias en el hemidelta norte: Olles, Illa del Mar y Pal. Y cinco en el hemidelta sur: Campredó, Ala, Baladres, Riet e Illa de Riu-Serrallo. Lo deseable es que todas ellas pasasen por unos filtros verdes.



7 ZONIFICACIÓN Y PROPUESTAS DE ACTUACIONES

Una vez analizadas las diferentes alternativas y tipos de actuación que pueden realizarse a lo largo de la costa del Delta para intentar solucionar o paliar sus diversos problemas (apartado 6.3) en este capítulo se esbozan las propuestas de actuación basadas en los tipos de actuación analizados en el apartado 6.2, considerando como mejor opción las soluciones de acomodación, aunque se pueden introducir matices como son obras puntuales de aporte de sedimentos o retranqueos de la costa.

7.1 ZONIFICACIÓN DE LA COSTA DEL DELTA DEL EBRO

7.1.1 Sistema litoral del delta del Ebro

Antes de dividir por zonas la costa del delta del Ebro, debe conocerse y delimitar el sistema litoral independiente donde se encuentra inmerso el delta del Ebro. A continuación, se irá zonificando su costa en base a sus características físicas y geográficas.

El Delta del Ebro es una unidad morfológica independiente que depende de sí misma para su desarrollo y evolución. Históricamente se ha querido ver al río Ebro como una de las fuentes sedimentarias más importantes del litoral mediterráneo levantino, cuya influencia llegaba a muchos kilómetros al sur; actualmente, esta visión del Delta como fuente del sedimento levantino debe matizarse y analizarse y para ello tiene que estudiarse el comportamiento de la costa en los extremos sur y norte del Delta

Para que el sedimento que aporta el río Ebro al mar se incorporase al transporte longitudinal de sedimentos y fuese movido hacia el sur, la primera premisa debía ser que efectivamente el transporte neto longitudinal de sedimentos fuese hacia el sur en todo momento; pero, si nos fijamos en las playas inmediatamente al sur del Delta, en Las Casas de Alcanar (Figura 7.1), las playas al sur del puerto de Alcanar –Playa les Cases d’Acanar, El Marjal Norte y el Marjal Sur- están basculadas hacia el norte, hacia el Delta; indicando la existencia de un transporte neto hacia esa dirección y por tanto incompatible con un transporte neto hacia el sur. Así pues; el sedimento que recorre el lóbulo sur del Delta hasta la Punta de la Banya no puede salvar el brazo de mar que lo separa de tierra firme e ir hacia las playas indicadas; su destino solamente es la bahía de los Alfaques, el canal de entrada del puerto de Alcanar o de San Carles de la Rápita, o se queda en la Punta. Por tanto, el límite sedimentario de influencia del sistema deltaico es la propia Punta de la Banya.



CEDEX



Figura 7.1: Puerto de Alcanar, donde todas las playas al sur están basculadas hacia el norte; lo que indica un transporte longitudinal neto dirigido hacia esa dirección (Foto: Google Earth)

Si ahora nos trasladamos a la costa al norte del Delta, a L'Ampolla, observamos que la es acantilada con pocas playas, pequeñas casi encajadas –Les Avellanes, Els Campellans, o Baconé-; todas ellas basculadas hacia el sur (Figura 7.2), lo que muestra una tendencia de transporte longitudinal neto hacia el sur; esto es, contrario a enviar arena del delta o del río Ebro hacia el norte.



Figura 7.2: Puerto de L'Ampolla, donde todas las playas al norte están basculadas hacia el sur; lo que indica un transporte longitudinal neto dirigido hacia esa dirección (Foto: Google Earth)

Por tanto, el sistema litoral del Delta del Ebro (Figura 7.5) está delimitado hacia el norte por L'Ampolla y hacia el sur por Casas de Alcanar.

Esto no quiere decir que el material fino en suspensión no se traslade mediante las corrientes costeras lejos de él, donde el flujo de agua del río lo envía lejos de la costa.

Diversos estudios han zonificado la costa de la plataforma deltaica. Todos ellos lo han hecho siguiendo el comportamiento respecto del oleaje, y especialmente centrados en la dirección que adquiere la costa y las singularidades que se producen en ella. Ejemplo de ella es la que se realizó en el informe del CEDEX (1996) donde se zonificó la costa siguiendo su alineación (Figura 7.3), cuyo resultado final es similar al utilizado por el LIM (2000 y 2011); donde la frontera entre una y otra zona lo marca el cambio de dirección (Figura 7.4). Por tanto la combinación de ambas daría el resultado de la Figura 7.5.

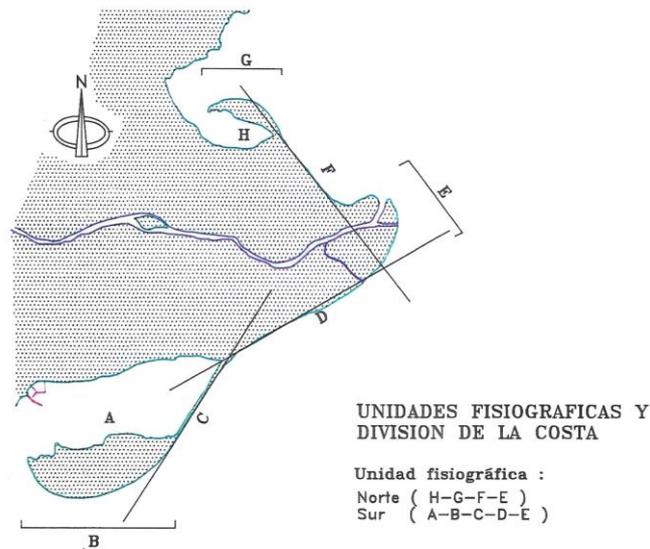


Figura 7.3: Zonificación de la costa del Delta por sus alineaciones en el informe del CEDEX (1996)

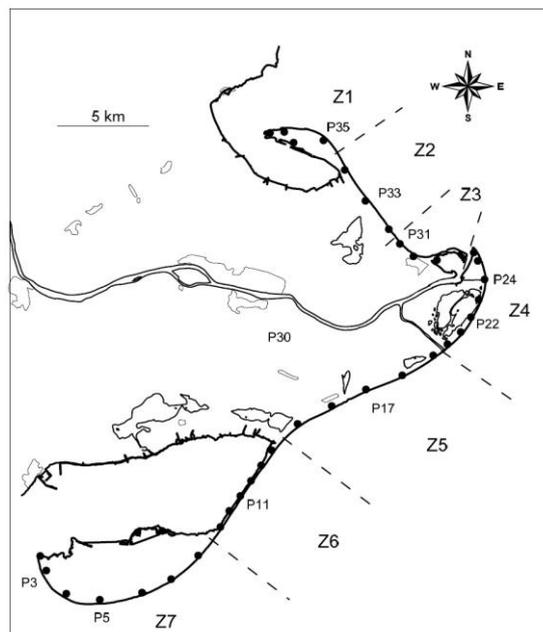


Figura 7.4: Zonificación de la costa del Delta por su cambio de dirección en los trabajos del LIM (2000 y 2011)



Figura 7.5: Sistema litoral y zonificación de la costa del Delta del Ebro (Foto: Google Earth)

Las zonas así divididas (Figura 2.5) corresponderían, de norte a sur, a:

S_{norte} = Sumidero norte, bahía del Fangar y L'Ampolla.

Z₁ = Extremo oeste de la península del Fangar.

Z₂ = Extremo este de la península del Fangar y playa de la Marquesa

Z₃ = Playa de Riumar y el Garxal

Z₄ = San Antonio (A) e Isla de Buda (B)

Z₅ = Eucaliptus

Z₆ = Trabucador

Z₇ = Península de la Banya

S_{sur} = Sumidero sur, bahía de los Alfaques

Existen dos puntos singulares: El primero de ellos es la desembocadura del Río –Fuente (Figura 7.5)-, y el segundo es el Cabo Tortosa cuya antigua desembocadura hace que la costa cambie de dirección y por ello se ha separado el tramo Z₄ en dos; siendo un elemento de transición entre la zona norte y sur del Delta.

7.1.2 Partes de la costa del Delta del Ebro

La zonificación de la costa del Delta que se acaba de realizar muestra, nitidamente, dos partes: Norte y sur, separadas por el cauce del río y su desembocadura. Por tanto, las partes en que se ha dividido el Delta para este estudio son (Figura 5.6):

- Hemidelta norte (S_{norte} , Z_1 , Z_2 , y Z_3)
- Desembocadura (Z_4)
- Hemidelta sur (Z_5 , Z_6 , Z_7 , y S_{sur})



Figura 7.6: Partes de la costa del Delta del Ebro (Foto: Google Earth)

7.1.2.1 Descripción del Hemidelta norte

El Hemidelta norte (Figura 7.7) tiene un frente en forma de S invertida alargada. Su parte central más larga, formada por las playas de Balsa de la Arena, la Marquesa y el extremo de la playa Punta del Fangar, tiene una alineación recta de 143° -y normal a la costa de 53° . El lóbulo norte gira desde esa dirección a $85,5^{\circ}$; dejando un pasillo, golfo de L'Ampolla, en cuyo fondo se encuentra la playa del Arenal que tiene una dirección de $154,5^{\circ}$. El extremo

sur lo constituyen la playa de Riumar y el Garxal, formación arenosa ligada a la desembocadura, que gira hasta tomar una alineación de 54° . Finaliza este tramo en la desembocadura del río Ebro, que lo hace con una dirección de 30° aproximadamente.



Figura 7.7: Partes del Hemidelta norte del Ebro (Foto: Google Earth)

Además, en el límite norte del sistema litoral, pero fuera de él, se encuentra el puerto de L'Ampolla, y dentro de la bahía del Fangar se halla el puerto de Illa del Mar.

Todos estos tramos se situarían respecto a la zonificación realizada en la Figura 7.6:

S_{norte} : Playa del Arenal y puerto de Illa del Mar.

Z_1 : Playa de Punta del Fangar.

Z_2 : Playas de Punta del Fangar, de la Marquesa y Balsa de Arena

Z_3 : Playa de Riumar y el Garxal

7.1.2.2 Descripción de la desembocadura

La zona de la desembocadura está constituida por el cabo Tortosa que ha ido mermando su forma desde un triángulo apuntado hacia el este, hasta una planta roma con forma de arco de circunferencia de unos 2.800 m, en la actualidad. También la desembocadura ha cambiado, pasando de tener una salida en dirección este cuando su forma era puntiaguda a tener una salida en dirección N30E actualmente. A uno y otro lado de la actual salida tiene dos lóbulos: el del oeste se conoce como el Garxal; y el del este, de forma triangular, es la Illa de Sant Antoni. La costa en este último punto tiene dirección 171° (Figura 7.8).



Figura 7.8: Partes de la desembocadura del río Ebro

Tras pasar la antigua desembocadura, la costa gira, tomando una dirección de 195° que forma la playa de la Illa de Buda; un cordón litoral muy debilitado que alberga la laguna de Illa de Buda o Calaix Gran. La zona sur de la playa, hasta alcanzar la gola Migjorn, gira casi 30° hasta alcanzar los 222° y aumenta la anchura del cordón.

Todo este tramo tan heterogéneo compone la zona Z_4 respecto a la zonificación hecha (Figura 7.6)

7.1.2.3 Descripción del hemidelta sur

El Hemidelta sur (Figura 7.9) tiene dos lóbulos extremos constituidos por la desembocadura al norte y la península de la Banyà al sur, y una dirección media de 227° . Al sur de la Gola Migjorn se desarrolla la playa del Serrallo que tiene una dirección de 240° , que se mantiene en la siguiente playa al sur, de los Eucaliptus. La costa comienza a girar en la siguiente playa, de L'Aluet, tomando una dirección media de 230° . Seguidamente se abre la barra del Trabucador que tiene una dirección media de 213° y una longitud de cerca de 6 km, que acaba en la península de la Banyà cuya costa va girando desde esa dirección hasta los 347° en la boca de entrada de la bahía de los Alfaques.

Todos estos tramos se situarían respecto a la zonificación realizada en la Figura 7.6:

Z_5 : Eucaliptus (playas del Serrallo, Eucaliptus y L'Aluet)

Z_6 : Playa del Trabucador

Z_7 = Península de la Banyà

S_{sur} = Sumidero sur, bahía de los Alfaques



Figura 7.9: Partes del Hemidelta sur del Ebro (Foto: Google Earth)

7.2 PROPUESTA DE ACTUACIONES

El conjunto de actuaciones que se proponen a continuación son un elemento razonado que surge del análisis de los problemas y del tipo de actuaciones que pueden realizarse para su solución, que se han estudiado en los capítulos anteriores. Por ello, a fin de que se comprenda en todo su contexto; primeramente se presentan los objetivos que persiguen; a continuación se analizan las necesidades de información y control que tienen que tenerse para que se puedan realizar correctamente; luego se pasa a definir la forma de trabajo de la actuación; del material a mover; de las obras auxiliares que pueden necesitarse; las actuaciones complementarias que pueden conllevar; y finalmente se hace una descripción de las actuaciones que recogen las variables como condicionantes que intervienen, y su análisis.

7.2.1 Objetivo de las actuaciones

Cuando se ha tratado de los tipos de alternativas, la acomodación se presenta como una actuación que se acople a una dinámica lo más natural posible; por tanto, cumple las exigencias que se deben dar para solucionar los problemas globales detectados, y que se recuerda que son (apartado 6.3.1): 1) Falta de aportes de sedimentos; 2) Descompensación sedimentaria; 3) Falta de regulación y control de los sumideros y sus agentes; y 4) Inundación de la plataforma deltaica.



Esta alternativa está estudiada y analizada en el apartado 6.2 cuyos objetivos se pueden resumir en:

1. Acomodarse al medio y sus agentes: evolución natural (Dinámica)
 - Dejando actuar a los procesos: evolución natural libre, y adaptándose a ellos sin abandono del Delta
 - Cuando ello sea posible o se considere necesario para aumentar la eficiencia de la principal actuación propuesta, se podrán revertir los procesos erosivos, recirculando el sedimento en el Delta, llevándolo desde las zonas en acreción a las zonas en erosión.
2. Evitar defensas costeras rígidas (espigones, muros, etc.).
3. Las acciones estén encaminadas a evitar y eliminar en lo posible la descompensación sedimentaria entre el Hemidelta norte y el Hemidelta sur.
4. Protección transversal frente a la inundación; garantizando una cota de berma, duna o frente costero que evite los rebases de oleaje, teniendo en cuenta la previsión de la subida del nivel del mar y la subsidencia natural del frente deltaico.
5. Protección frente a las erosiones que pongan en peligro tanto a personas, como bienes y unidades morfológicas de interés natural.
6. Garantizar el mantenimiento de la actividad económica, en muchos casos deberá adaptarse a la nueva realidad.

7.2.2 Necesidades

Las propuestas de actuación están encaminadas a solucionar una serie de problemas indicados anteriormente, para ello es necesario realizar una serie de acciones que se pueden resumir en:

1. Control de salida de sedimentos: Sabiendo tanto los aportados por el río Ebro como por los que pueden obtenerse tanto dentro como fuera del sistema litoral (apartado 6.4.1.1). Es muy importante desde este punto de vista el conocimiento de la capacidad aportadora de la cuenca baja del río Ebro no regulada.
2. Control de sumideros: Es necesario conocer cuánta cantidad de sedimento, en especial arena, se deposita en las bahías del Fangar-L'Ampolla y Alfaques, y cuánto es atrapado por los canales de navegación de Alcanar y San Carles de la Rápita. Esto ayudaría a conocer con mayor exactitud la circulación de arena en el sistema litoral del Delta. Además, debe realizarse un control para evitar que entren en estos grandes sumideros.
3. Control de la línea de costa: Las transformaciones que se producen a lo largo de las costas del Delta dan indicación de los lugares donde se están produciendo erosiones y acumulaciones, y en qué medida lo hacen. Este control debe ser objeto de un seguimiento continuo que permita conocer tanto estas variaciones anuales como las fluctuaciones estacionales y las que se producen en eventos extraordinarios como temporales.



4. Control de la franja activa litoral del Delta: La evolución natural de las playas del Delta hace que se tenga previsto un retroceso de la franja activa de costa que se debe determinar con objeto de ajustar el deslinde del DPMT y la servidumbre de protección si este retroceso fuese excesivo.

7.2.3 Formas de trabajo que pueden incluir las propuestas

Las bases de la propuesta de las acciones o actuaciones que deben emprenderse a lo largo de las costas de Delta del Ebro son las siguientes:

- Permitir una evolución natural pero controlada de la costa del Delta y reservar para ello una franja litoral libre cuya anchura dependerá de las otras acciones que se emprendan conjuntamente. La base técnica es la misma expuesta en las propuestas de actuación del LIM (2011 y 2018), y Galofré *et al.* 2012, resumidas en los apartados 6.2.1.1 y 6.4.1.1.
- Incrementar la cota en la zona de dominio público para reducir la intrusión marina en la llanura deltaica en eventos especiales; debiendo considerarse la subida del nivel del mar y la subsidencia del terreno.
- Recircular el sedimento: Se pueden usar las zonas de depósito como elemento frontera para revertir los transportes longitudinales, con el fin de reducir la tasa erosiva de los tramos de costa; para ello se necesitan:
 1. Controlar las zonas de depósito y de su avance anual.
 2. Impedir que el sedimento, fracción de arena, penetre en la zona de bahías y se mezcle con la fracción más fina de fangos.
 3. Definir las zonas de erosión-depósito, y realizar en ellas trasvases periódicos, reponiendo el material en zonas próximas a las fuentes.
 4. Conocer si es necesario complementar con un trasvase desde el sumidero hasta la fuente y/o desde el Hemidelta norte hacia el Hemidelta sur.
- Controlar los procesos naturales transversales: especialmente en las playas barrera donde se rebasan y depositan en aguas someras de las bahías sin posibilidad de su reversibilidad natural. Pueden considerarse como reperfilados de mantenimiento después de grandes temporales.
- Controlar el dragado de los puertos y estudiar la posibilidad de uso del material extraído.

7.2.4 Condicionantes de la arena a mover

La cantidad de material que habría que mover dependerá de los siguientes factores:

- 1- Volumen de arena anual, o del periodo a determinar, depositada y erosionada a lo largo de la costa del Delta.



- 2- Balance sedimentario en el Hemidelta norte: cuando éste sea positivo el excedente puede ser trasvasado al Hemidelta sur.
- 3- Las cantidades previsibles a mover serán las que da el balance sedimentario (apartado 4.3.2); que da una horquilla global situada entre 150.000 y 450.000 m³/año, siendo estas cantidades orientativas.
- 4- El material de reperfilado transversal de las bahías y cordones litorales se hará a medida que lo exija el mantenimiento (por ejemplo: en la barra del Trabucador se hallaría en el entorno de 30.000 a 16.000 m³/año, o lo que es lo mismo entre 5 y 2,5 m³/año metro lineal de playa)

7.2.5 Obras auxiliares

Para optimizar las tareas asociadas a la gestión del sedimento (trasvases) puede ser necesario impedir la entrada de una parte importante de la arena hacia las bahías; en efecto, su recuperación dentro de ellas puede ser más difícil y costosa.

Las alternativas a ello pueden ser varias: zanjas, concavidades, etc.; aunque podrían contemplarse obras auxiliares de retención como espigones, estas no encajan con los objetivos del Plan (apartado 7.2.1, punto 2º, Evitar defensas costeras rígidas). Por tanto, en su caso, necesitarían de un estudio específico para evaluar su necesidad y optimizar su diseño.

7.2.6 Actuaciones complementarias

Se pueden considerar de dos tipos: Una de ellas corresponde al contorno del territorio y la otra pertenece al seguimiento de las actuaciones.

Respecto al contorno del territorio, caben entre otras consideraciones:

- 1- Limitar y controlar las zonas urbanas en el frente costero; esto es especialmente importante en Riumar.
- 2- Favorecer accesos con movilidad sostenible (ciclista, patinete, etc.)

En cuanto al seguimiento de las actuaciones ya se ha esbozado en los puntos 7.2.2 y 7.2.3, que podría englobarse como seguimiento general:

- 3- Estudio de la cuenca del río Ebro no regulada, con la capacidad de aportes de arena, etc. (siguiendo un esquema similar a llevado a cabo en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en 2020, ver capítulo 3).
- 4- Estudio de aprovechamiento subsidiario y/o ocasional de las arenas retenidas en los embalses (Capítulo 3 y apartado 6.3.1.1) para cuando hubiera ocasión para ello (obras, desembalses, baja cota de embalses etc.) y su traslado al cabo Tortosa o la desembocadura del Ebro (Confederación Hidrográfica del Ebro y Centro de Estudios Hidrográficos).
- 5- Seguimiento de las actuaciones: Batimetría, perfiles, líneas de orilla, videos y fotos con drones, etc.; contemplando:



CEDEX

- a. Línea de costa de todo el Delta y lidar batimétrico.
- b. Batimetría de los sumideros (bahías de los Alfaques y Fangar-L'Ampolla).
- c. Control de dragados.
- d. Análisis batimétrico de curso bajo del Río (Centro de Estudios Hidrográficos).

7.2.7 Resumen de las actuaciones y alternativas propuestas

Las actuaciones que se proponen tienen como objetivo intentar resolver o paliar los problemas globales apuntados en el capítulo 2 (LIM-UB, 1999-2000, y LIM, 2011) y apartado 6.3.1. Es posible realizarse individualmente, o de manera conjunta y coordinada, y se basa en los principios apuntados en el apartado 7.2.3. Se pueden desglosar en las siguientes actuaciones:

- 1- Confección de un nuevo deslinde incorporando los terrenos que tengan características de Dominio Público
- 2- Realización de una franja de protección que permita el libre movimiento de la costa; se consideran de plena validez las soluciones apuntadas por el LIM (2011 y 2018), si bien debe contemplarse la elevación de berma que tenga en cuenta los horizontes de elevación del nivel del mar. Estará formada por la actual zona de DPMT y una franja de anchura necesaria para la libre evolución de las playas a adquirir como terrenos públicos.
- 3- Como actuación adicional, se plantea la posibilidad de realizar cuatro posibles trasvases:
 - I. De la Punta del Fangar hacia las playas de La Marquesa y Balsa de Arena, hasta el límite erosivo.
 - II. De la Punta del Fangar y/o Garxal-Riumar hacia la Cabo Tortosa-Illa de Sant Antoni.
 - III. De la Playa de Eucaliptus hacia la Illa de Buda u Cabo Tortosa.
 - IV. De la Punta de la Banyà hacia la norte de la playa del Trabucador
- 4- En caso de realizar la anterior actuación, podría ser conveniente construir diversos elementos de control y retención de arena antes de la entrada en los sumideros (bahías), en la punta del Fangar y la punta de la Banyà. Un estudio específico debe determinar cuál es la alternativa más adecuada.

Las alternativas dadas a estas actuaciones dependerán del grado de protección que se pretenda dar a la llanura deltaica, para lo cual deben realizarse los cálculos pertinentes que ayuden a una decisión final de estas propuestas de actuaciones esbozadas anteriormente y que se describen a continuación.

7.3 CÁLCULO PRELIMINAR DE LAS ACTUACIONES Y LAS VARIABLES QUE LO CONDICIONAN

Los cuatro problemas generales (apartado 6.3) pueden mitigarse y/o solucionarse con las actuaciones propuestas en el apartado 7.2.7. Pero, para analizar la efectividad de la adaptación o acomodación del perfil natural deben realizarse al menos dos cálculos: En planta, y alzado. Los resultados de ambos condicionarán la elección de las actuaciones anteriormente señaladas.

7.3.1 Variables para la configuración de un perfil natural de acomodación del Delta del Ebro

Las variables que están presentes en la configuración de la propuesta de perfil natural de acomodación del Delta son (Figura 7.10):

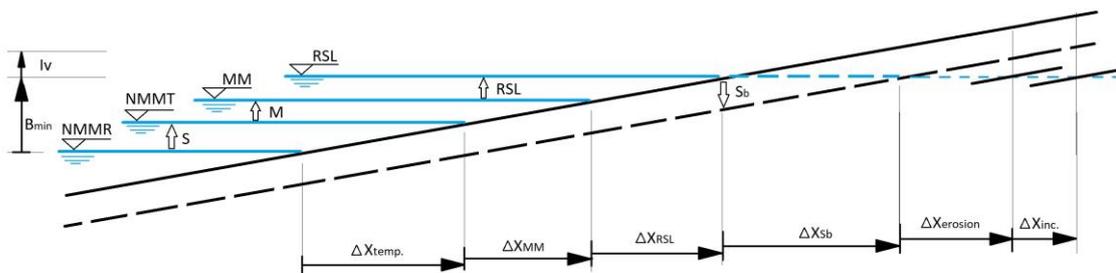


Figura 7.10: Variables del proceso de configuración de un perfil natural en la costa del Delta del Ebro

con los significados de las siglas siguientes:

- NMMR Nivel medio del mar en reposo en el momento actual.
- NMMT Nivel medio del mar en temporal con un periodo de retorno T .
- S Nivel de subida en temporal, *Setup*.
- MM Marea meteorológica, cuyo valor es M .
- RSL Subida del nivel medio del mar debido al cambio climático; dependerá del año de referencia (se tomará el año 2100, como el LIM).
- Sb Subsistencia.
- Te Tasa erosiva; erosión o retranqueo anual de la línea de costa por pérdida de arena.
- Inc. Incremento asociado a la incertidumbre en los datos de proyecciones de cambio climático.

- Bmin Altura mínima de la berma para que no se produzcan inundaciones.
- lv Incertidumbre vertical debida a diversos factores.

En los apartados siguientes, se van determinando los valores que pueden tomar estas variables que fijarán tanto la variación de la línea de orilla como la altura de berma mínima necesarias.



7.3.2 Ecuaciones que rigen la variación de la línea de orilla

Separadas las exigencias tanto en la variación horizontal de la línea de orilla como en la de anchura de berma mínima, las ecuaciones que rigen el proceso son (ver Figura 7.10):

Retroceso de la línea de orilla activa:

$$R = \Delta X_{\text{tem}} + \Delta X_{\text{MM}} + \Delta X_{\text{RSLR}} + \Delta X_{\text{Sub}} + \Delta X_{\text{erosion}} + \Delta X_{\text{Inc}}$$

Altura de berma:

$$\text{Berma} = B = B_{\text{min}} + I_v$$

Estas ecuaciones se van a comparar con los valores tomados por el LIM (2011, 2018), Figura 7.11, que se suponen correctos en primera aproximación (que utiliza variables diferentes).

Nótese que en este Plan se ha empleado una notación similar a la de LIM, pero no idéntica.

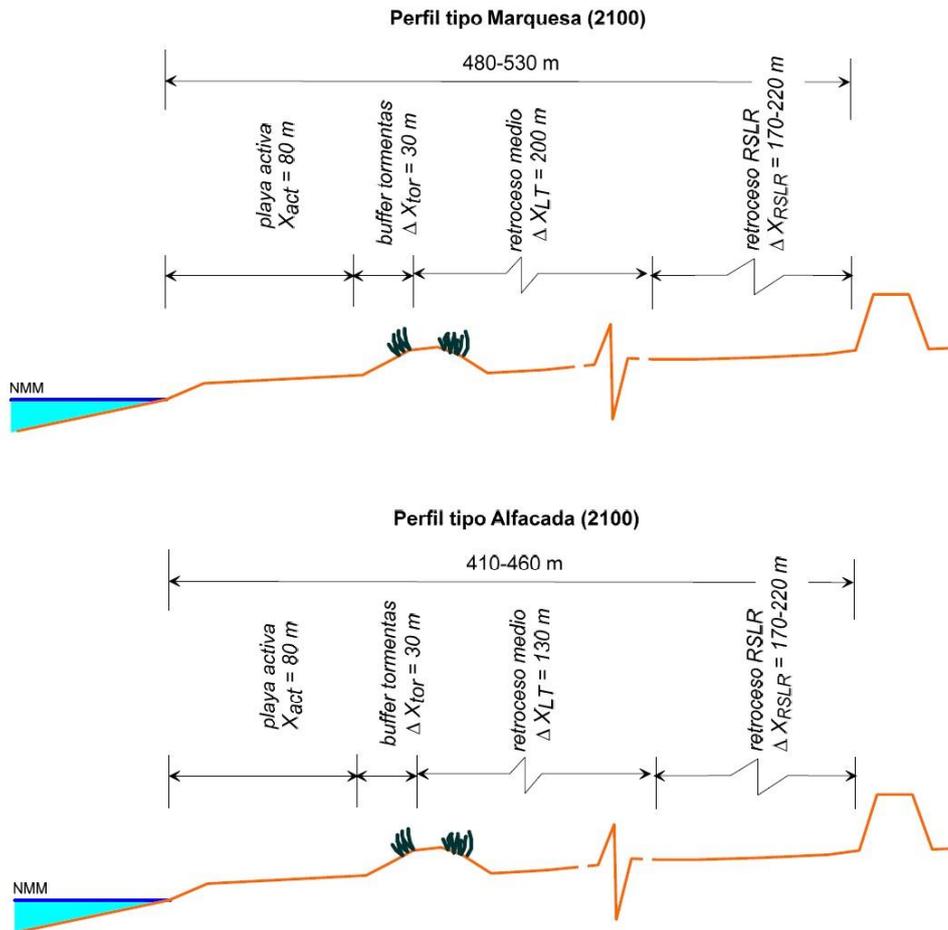


Figura 7.11: Perfiles de playa tipo de acomodación. En la parte superior perteneciente al Hemidelta norte, y en la parte inferior al sur del lóbulo central del Delta (Fuente: LIM, 2018)



En ellos, el resguardo del perfil está formado por (LIM, 2011):

$$\Delta X_{ADAPT} = X_{act} + \Delta X_{LT} + \Delta X_{tor} + \Delta X_{RSLR}$$

Siendo:

ΔX_{LT} = Retroceso estimado para un periodo de 50 años, con una tasa erosiva de 3,5 m/año 175 m (misma variable que $\Delta X_{erosion}$).

ΔX_{tor} = Retroceso añadido debido a los temporales que estiman en 30 m (misma variable que ΔX_{tem}).

ΔX_{RSLR} = Retroceso de la línea de orilla debido a la subida del nivel del mar; es del orden de 75 m (LIM, 2011).

X_{act} = Estima del “ancho de playa activa”. Este ancho sería la parte de la costa emergida activa bajo la influencia del clima marítimo de la zona a largo plazo; es del orden de 150 m (LIM, 2011).

Dando unos valores (LIM, 2011):

Playa de la Marquesa:

$$\Delta X_{ADAPT} = \Delta X_{LT} + \Delta X_{tor} + \Delta X_{RSLR} + X_{act} = 175 + 30 + 75 + 150 = 430 \text{ m}$$

En (LIM, 2018) se actualizaron estos datos, que son los que se muestran en la Figura 7.11:

Playa de la Marquesa (LIM, 2018):

$$\Delta X_{ADAPT} = \Delta X_{LT} + \Delta X_{tor} + \Delta X_{RSLR} + X_{act} = 200 + 30 + [170 \text{ a } 220] + 80 = 480 \text{ a } 530 \text{ m}$$

Zona de la Alfacada (LIM, 2018)

$$\Delta X_{ADAPT} = \Delta X_{LT} + \Delta X_{tor} + \Delta X_{RSLR} + X_{act} = 130 + 30 + [170 \text{ a } 220] + 80 = 410 \text{ a } 460 \text{ m}$$

Por lo que se estimaba una franja libre de unos 500 m para un periodo horizonte de 50 años.

No se analiza o estima al altura de berma; se finalizan los perfiles con lo que sería un caballón o duna sin precisar altura. Esta estimación sí se incluye, para esta misma tipología de solución, en Galofré et al. (2012) que indican que: “el esquema propuesto es de playa-duna-humedal. En la parte de atrás de este esquema, 500 m del dominio público, se propone una duna “rígida”. Un paseo marítimo y carril bici en la cima de esta duna. Esta duna se proyecta con 1,5 m de altura para evitar inundaciones, como consecuencia de la subida del nivel del mar (RSLR) y efectos del cambio climático” (traducido del inglés).

No se tiene en cuenta el grado de incertidumbre que presentan estos datos, aunque sí con todo el resto de variables (subida del nivel del mar en dos escenarios RCP4.5 y 8.5, y subsidencia de 3 mm/año).

Para corroborarla validez de estos datos, a continuación se analizan cada una de las variables con el esquema expuesto anteriormente y se compara con las estimadas por el LIM.



CEDEX

7.3.2.1 Retroceso de la línea de orilla debido a los temporales

Es un retroceso momentáneo debido a la configuración del perfil para hacerse más disipativo cuando incide sobre la playa un determinado oleaje. El informe del LIM lo denomina tormentas y el valor tomado es de (LIM, 2011 y 2018):

$$\Delta X_{\text{tor}} = 30 \text{ m}$$

Habría que tener en cuenta lo que el LIM llama playa activa que podría asimilarse a erosión y avance por oleaje:

$$X_{\text{act}} = 80 \text{ m}$$

Por lo que el valor del LIM total:

$$\Delta X_{\text{tem}} = \Delta X_{\text{tor}} + X_{\text{act}} = 110 \text{ m}$$

Si ahora se asimila este valor con las fluctuaciones máximas de la línea de orilla debido al oleaje, determinadas en el informe “Estudio de perfiles de playa y su adaptación a las costas españolas” (Sánchez y Peña-CEDEX, 2009); donde se indica que la fluctuación máxima para las playas del Mar Mediterráneo tiene un valor de: $30 H_{0,137}$; esto es, si se toman los valores de la altura de ola del LIM, daría:

$$H_{12} = 3,6 \text{ m} \quad \Delta X_{\text{tem}} = 108 \text{ m}$$

$$H_{(PR=10 \text{ años})} = 5,33 \text{ m} \quad \Delta X_{\text{tem}} = 160 \text{ m}$$

$$H_{(PR=25 \text{ años})} = 5,92 \text{ m} \quad \Delta X_{\text{tem}} = 77 \text{ m}$$

$$H_{(PR=50 \text{ años})} = 6,35 \text{ m} \quad \Delta X_{\text{tem}} = 90 \text{ m}$$

Por lo que el valor dado por el LIM de 110 m, puede tomarse como medio; siendo la horquilla de:

$$\Delta X_{\text{tem}} = 108 \text{ a } 190 \text{ m}$$

Bien es cierto, que debe matizarse que estos valores son los máximos; pero, éstos dependen de la altura de ola, que incidirá en cada zona de la costa del Delta de una manera diferente.

7.3.2.2 Retroceso debido a la subida del nivel del mar

El retroceso de la línea de costa debido a la subida del nivel del mar por el cambio climático depende del tipo de costa. Si se resumen los resultados de los estudios en este aspecto, se obtiene:

Los trabajos del LIM (2011 y 2018) dan un valor medio del retroceso en una horquilla de:

$$\Delta X_{\text{RSLR}} = 175 \text{ a } 200 \text{ m (para el 2100)}$$

En este trabajo (capítulo 5), se han obtenido los siguientes resultados (Tabla 7.1):



Tabla 7.1: Retroceso estimado de la línea de orilla por subida del nivel del mar debido al cambio climático (en m)				
Zona	Año 2050		Año 2100	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Arenal	30	40	130-140	160-170
Illa de Buda	20	30	170-210	200-270
Trabucador	40	40-70	170-290	210-360

Resumiendo los valores máximos de la tabla 7.1:

- Costa del delta:
 - 170 m (RCP8.5 y año 2100)
 - 40m (RCP8.5 y año 2050)
- Playas barrera del delta:
 - 360 m (RCP8.5 y año 2100)
 - 70 m (RCP8.5 y año 2050)

Por tanto, la horquilla de valores que se toman son:

$$\Delta X_{RSLR} = 130 \text{ a } 170 \text{ m (para el 2100) (Delta)}$$

$$\Delta X_{RSLR} = 170 \text{ a } 270 \text{ m (para el 2100) (Illa de Buda)}$$

$$\Delta X_{RSLR} = 170 \text{ a } 360 \text{ m (para el 2100) (Trabucador)}$$

Si se compara los resultados obtenidos en este informe y los que presentan los estudios del LIM, se observa que éstos tienen similares valores para el retroceso para las costas del Delta, pero no para las playas barrera, donde se ha estimado para el presenta Plan un valor superior.

7.3.2.3 Retroceso debido a la marea meteorológica

Los trabajos del LIM proporcionan la distribución extremal de oleajes, que se muestra en la Figura 1.11, si se toma en ella los valores del periodo de retorno de 100 y 50 años (Figura 7.12), daría:

$$MM = 1,43 \text{ m (Periodo de retorno 100 años)}$$

$$MM = 1,30 \text{ m (Periodo de retorno 50 años)}$$



CEDEX

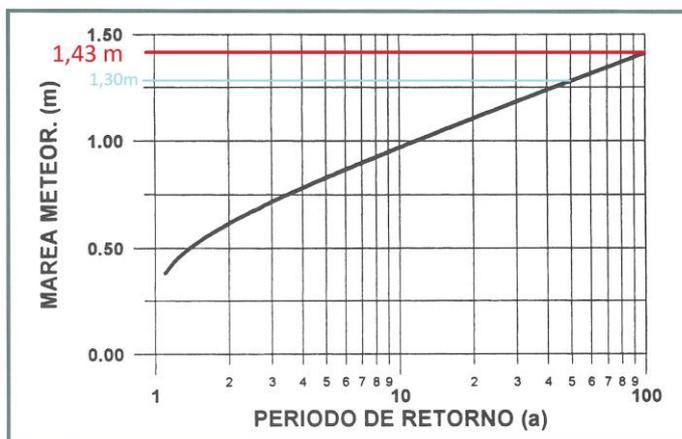


Figura 7.12: Distribución extremal de marea meteorológica y valor de ella para un periodo de retorno de 100 años (Fuente: Sánchez-Arcilla et al., 1997)

Tomando las pendientes medias límites de los perfiles del Delta (LIM, 2000 y 2011) de 0,1% y 0,6%, y el valor medio de 0,3% se tendrían unos retrocesos de:

- Pendiente 0,001: $\Delta X_{MM} = 1.430$ m (1.300 m con PR=50 años)
- Pendiente 0,003: $\Delta X_{MM} = 477$ m (433 m con PR=50 años)
- Pendiente 0,006: $\Delta X_{MM} = 238$ m (217 m con PR=50 años)

Se produce en eventos ocasionales y son las mayores causantes de la intrusión marina en la plataforma del Delta y en sus lóbulos o flechas.

7.3.2.4 Retroceso debido a la subsidencia

El valor que los diversos especialistas han dado a la subsidencia (LIM, 2000, 2011 y 2018) oscila entre 0,001 y 0,003 m/año; por lo que el valor esperado del retroceso de la línea de costa por este concepto vendrá dado por:

$$\Delta X_{sb} = \frac{Sb \cdot t}{m}$$

Siendo: Sb el valor de la subsidencia (0,001 a 0,003 m/año); t el periodo de tiempo para el 2050 y 2100 (30 y 80 años); y m la pendiente de la playa (0,003 a 0,006). Los valores obtenidos serían los que se muestran en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2: Retroceso estimado de la línea de orilla por subsidencia (en m)				
Subsidencia	Año 2050		Año 2100	
	0,3%	0,6%	0,3%	0,6%
0,001	10	5	27	13
0,003	30	15	80	40



Por lo que los retrocesos máximos de la línea de costa por subsidencia de la plataforma deltaica para el horizonte de 2100 se encuentran entre 13 y 80 m

7.3.2.5 Retrocesos debido a la erosión de la costa

Las “Directrices sobre actuaciones en playas” (MITERD, 2008) indican en su apartado 4.1.1:

“La anchura mínima inicial de ese periodo A_1 ha de ser tal que sea la suma de las previsibles pérdidas de anchuras de playa, estacional o permanente, más el mínimo resguardo para defensa de los bienes tras de ella. Estas pérdidas en anchura de playa parciales son:

Aerosión Pérdida estimable de playa por erosión en un tiempo igual al periodo de retorno

Aestacional Retroceso estacional de la línea de orilla por cambio de perfil y retroceso de la línea de orilla por basculamiento de la playa, máximos esperables en el periodo de retorno

Asubida del nivel del mar Retroceso de la línea de orilla por sobreelevaciones estacionales máximas y subida del nivel del nivel medio del mar, en el periodo de retorno

Aresguardo Mínima anchura de playa para que no deje de actuar como defensa de playa, anchura de seguridad

$$A_1 = A_{\text{erosión}} + A_{\text{estacional}} + A_{\text{subida del nivel del mar}} + A_{\text{resguardo}}$$

Por lo que, debe considerarse tanto la anchura de playa que previsiblemente se puede erosionar como el resguardo mínimo que podría considerarse dentro del que en este informe se ha llamado de “incertidumbre”.

El retroceso por erosión viene determinado por:

$$\Delta X_{\text{erosion}} = e_a t$$

Siendo: e_a la erosión media anual en un punto de la costa; y t el número de años horizonte.

Para conocer la erosión media anual, o tasa de evolución, se han tomado los valores máximos y mínimos (casos más desfavorable y favorables) para cada zona que determinan los trabajos del LIM (2011 y 2018). En el siguiente listado los valores positivos representan zonas de acumulación mientras que los negativos corresponden a zonas erosivas:

- Z_1 (Fangar): + 20 m/año
- Z_2 (Marquesa): -4,7 a +1,2 m/año
- Z_4 (Desembocadura- Alfacada): -21,6 a -2,8 m/año
- Z_5 (Eucaliptus): +6,4 a +6,9 m/año
- Z_6 (Trabucador): -3,6 a -5,6 m/año
- Z_7 (La Banyà): +9 m/año

Si ello se aplica a los horizontes de 2050 y 2100, las variaciones de la costa por este concepto serían (Tabla 7.3):



CEDEX

Tabla 7.3: Variación estimada de la línea de orilla por erosión (en m)				
Zona	Año 2050		Año 2100	
	Min.	Max	Min.	Max
Z ₁ (Fangar)		+600		+1.600
Z ₂ (Marquesa)	-141	+36	-376	+96
Z ₄ (Desembocadura- Alfacada)	-84	-648	-242	-1.728
Z ₅ (Eucaliptus)	+192	+207	+512	+555
Z ₆ (Trabucador)	-108	-168	-228	-448
Z ₇ (La Banya)		+270		+720

7.3.2.6 Estimación del retroceso asociado a la incertidumbre

Para tener en cuenta la incertidumbre de los distintos datos presentados hasta el momento se ha considerado un resguardo (término adoptado de las "Directrices de actuaciones en playas" (MITERD, 2008), ΔX_{Inc} , que englobaría las siguientes tres variables:

- Subida del nivel del mar debido al cambio climático
- Subsistencia
- Tasa de erosión

7.3.2.7 Retroceso total

La determinación de la variación total esperada a lo largo de la costa del Delta, se realiza aplicando la ecuación de retroceso de la línea de orilla activa dada al comienzo del apartado 7.3.2:

$$R = \Delta X_{tem} + \Delta X_{MM} + \Delta X_{RSL} + \Delta X_{Sb} + \Delta X_{erosion} + \Delta X_{Inc}$$

Eliminando el último de los términos, asociado a la incertidumbre la ecuación queda de la siguiente manera:

$$R^* = \Delta X_{tem} + \Delta X_{MM} + \Delta X_{RSL} + \Delta X_{Sb} + \Delta X_{erosion}$$

cuyos resultados al aplicar los valores obtenidos en el apartado anterior se muestran en la Tabla 7.4.

Si se considera el avance de la costa debido a la marea meteorológica (ΔX_{MM}) como un evento extremo que puede, de alguna manera, laminarse mediante el cierre vertical; o se puede asumir que se produzca en esa magnitud en una ocasión a lo largo del periodo; y se aplica entonces la variable de retroceso:

$$R^{**} = \Delta X_{tem} + \Delta X_{RSL} + \Delta X_{Sb} + \Delta X_{erosion}$$

La variación estimada vendría dada por la Tabla 7.5; que se correspondería a las variables consideradas por los trabajos del LIM (2011 y 2018) y Galofré et al. (2012).

Tabla 7.4: Variación estimada de la línea de orilla (R^*) (en m) para 2100

Zona	Variables					Total		
	ΔX_{tem}	ΔX_{MM}	ΔX_{RSL}	ΔX_{Sb}	$\Delta X_{erosion}$	Min.	Max.	Med.
Z ₁ (Fangar)	-108	-477/-1.430	-210/-360	-40/-80	1.600	725	-378	173
Z ₂ (Marquesa)	-108	-238	-160/-170	-40	-376/96	-234	-932	-583
Z ₄ (Desembocadura-Alfacada)	-108	-238	-160/-170	-40	-1.728/-242	-788	-2.284	-1.536
Z ₅ (Eucaliptus)	-108	-238	-160/-170	-40	512/555	9	-44	-17
Z ₆ (Trabucador)	-108	-447	-170/-290	-40/-80	-228/-448	-993	-1.373	-1.183
Z ₇ (La Banya)	-108	-228/-447	-160/-170	-40/-80	720	85	335	125

Tabla 7.5: Variación estimada de la línea de orilla (R^{**}) (en m) para 2100

Zona	Variables				Total		
	ΔX_{tem}	ΔX_{RSL}	ΔX_{Sb}	$\Delta X_{erosion}$	Min.	Max.	Med.
Z ₁ (Fangar)	-108	-210/-360	-40/-80	1.600	1.052	1.322	1.187
Z ₂ (Marquesa)	-108	-160/-170	-40	-376/96	-212	-694	-453
Z ₄ (Desembocadura-Alfacada)	-108	-160/-170	-40	-1.728/-242	-550	-2.046	-1.298
Z ₅ (Eucaliptus)	-108	-160/-170	-40	512/555	194	247	220
Z ₆ (Trabucador)	-108	-170/-290	-40/-80	-228/-448	-546	-926	-736
Z ₇ (La Banya)	-108	-160/-170	-40/-80	720	362	412	

7.3.2.8 Análisis de las variables de altura mínima de berma

Antes de entrar en consideración de la propuesta de actuación y definición de la franja de evolución libre, hay que conocer cuál es la altura que debe tener la berma, tal y como se ha indicado al comienzo del apartado 7.3.2, donde la altura de berma, B , viene dada por:

$$B = B_{min} + I_v$$

Y la de berma mínima por:

$$B_{min} = S + MM + RSL + Sb + (\Delta X_{erosion} \cdot m)$$



ELEVACIÓN POR OLEAJE (SETUP)

Se pueden considerar dos alturas que afectan a la acción del oleaje: setup, o elevación media de la superficie del mar; y runup, o alcance máximo o remonte del oleaje sobre la playa. Se ha tomado en consideración la primera de ellas porque esa subida es más permanente en el tiempo –si bien, podría considerarse perfectamente el remonte–.

Todas las fórmulas del setup empíricas, unidas a las teóricas obtenidas, dan un abanico ciertamente grande que puede dar lugar a confusión de cuál es la fórmula a utilizar más idónea. La respuesta la tenemos en las conclusiones del trabajo de Dean y Walton (2009) en el que nos recomiendan que como dato preliminar se use (Peña, 2019):

$$\frac{\bar{\eta}}{H_s} = 0,191 \pm 0,1$$

La altura de ola que puede tomarse se indica en el apartado 7.3.2.1 y es $H_{S12} = 3,6$ m, cuyo setup (S o η) generado sería

$$S = 3,6 \cdot (0,191 \pm 0,1) = 0,69 \pm 0,36 \text{ m}$$

ELEVACIÓN POR MAREA METEOROLÓGICA

Ya se ha calculado en el apartado 7.3.2.3, cuyo resultado fue (Figura 7.12):

$$MM = 1,43 \text{ m (Periodo de retorno 100 a)}$$

$$MM = 1,30 \text{ m (Periodo de retorno 50 a)}$$

ELEVACIÓN POR CAMBIO DEL NIVEL DEL MAR DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO

El análisis de los efectos del cambio climático, apartado 5.3.1.1 (Factor climático), muestra en la Tabla 5.9 los niveles esperados de subida del nivel del mar con los dos escenarios de emisión considerados (RCP4.5 y RCP8.5). Para este Plan se tomará un valor extremo:

$$RSLR_{2100} = 0,87 \text{ m}$$

ELEVACIÓN POR SUBSIDENCIA

Si se toma el valor ajustado, habitualmente aceptado, de Maldonado (1972) de 0,003 m/año; la subida compensada del nivel del mar de ella para 2100 sería:

$$S_b = 0,003 \cdot 80 = 0,24 \text{ m}$$

ELEVACIÓN POR TASA EROSIVA

Si se toma el caso más desfavorable de la tasa erosiva dada en los trabajos del LIM (2011 y 2018), para la llanura deltaica de 4,7 m/año y para Trabucador de 5,6 m/año se tendría una elevación por tasa erosiva para el año 2100 de:

$$\text{Llanura deltaica: } 376 \cdot 0,006 = 2,3 \text{ m}$$

$$\text{Trabucador: } 448 \cdot 0,006 = 2,7 \text{ m}$$



ELEVACIÓN MÍNIMA DE BERMA

La elevación que tendría que tener la berma sería:

$$B_{\min} = (0,69 \pm 0,36) + 1,43 + 0,87 + 0,24 + 2,3 = 5,53 \text{ m}$$

Así, suponiendo una pendiente media de la playa emergida del 0,6% y una distancia horizontal de 500 m se tendría una elevación de 3 m, por lo que se necesitaría una altura adicional de 2,23 m.

Si no se considerase la elevación por marea meteorológica máxima (inferior a 1,43 m) o por la tasa erosiva (inferior a 2,7 m), sería suficiente la propuesta de Galofré et al. (2012) de una duna con elevación 1,5 m; en caso de tener en cuenta estos dos conceptos sí habría que incrementar la elevación, hasta 2,23 m en el ejemplo propuesto.

7.3.3 Propuesta de actuaciones

La comparación de los resultados propuestos por el LIM (2011, 2018) y los obtenidos en este informe son coherentes, por lo que la franja litoral libre como defensa natural del Delta resulta apta, con las siguientes matizaciones:

Las anchuras de banda del LIM son muy generales, dando solamente dos perfiles (Figura 7.11); uno para el hemidelta norte y otro para el hemidelta sur. Pero, estas bandas habría que aumentarlas, a medida que se acerca a la punta del Delta, cabo Tortosa, o reducir las a medida que se acerca a la península del Fangar, en el hemidelta norte. Y, de la misma manera se haría para el hemidelta sur.

Adicionalmente, la anchura de las bandas propuestas podría reducirse si disminuyera el valor de anchura necesario para contrarrestar la erosión, $\Delta X_{\text{erosion}}$, para lo cual serían necesarios trasvases periódicos de arena.

Por tanto las actuaciones que se contemplan son:

1. Creación de una banda de protección costera libre que permita una evolución natural de la costa, formada por la actual zona de DPMT y una franja de anchura necesaria para la libre evolución de las playas a adquirir como terrenos públicos.
2. Adicionalmente, con objeto de controlar dicha evolución, trasvases periódicos de arena de las zonas de depósito (Fangar, Eucaliptus y Alfaques) hacia las zonas más erosivas (Marquesa, Cabo Tortosa y Trabucador)

7.3.3.1 Creación de una banda de protección costera libre

Esta actuación se contempla para toda la franja costera del delta, tanto exteriormente como en la costa de las bahías del Fangar y Alfaques. Se basa y se estructura básicamente en la propuesta por el LIM (2011 y 2018) y desarrollada también en otros trabajos como Galofré et al. (2012).

La descripción y tipologías de esta banda de protección, por tanto, es la analizada en el apartado anterior cuyas características principales se resumen en las Figuras 7.11 y 7.12, y Tablas 7.4 y 7.5, y cuyo esquema se resume en la Figura 7.13 siguiente:

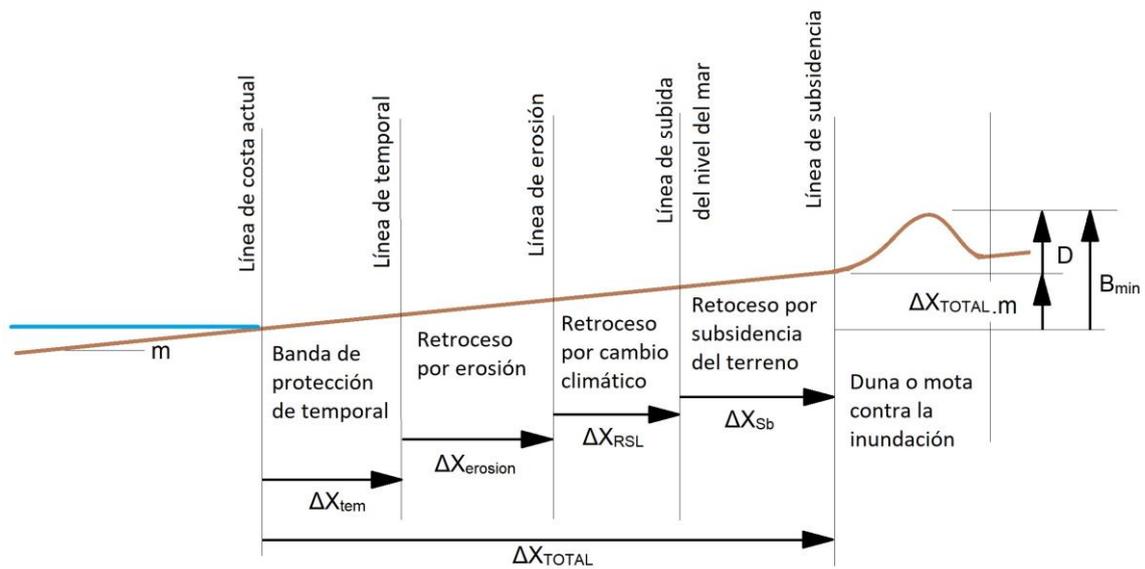


Figura 7.13: Esquema de perfil tipo de las playas de la llanura deltaica del Ebro

En aquellas zonas del Delta costero donde esta banda de libre movimiento se encuentra sobre terrenos públicos (Figura 7.14) no tienen por objeto realizar esta actuación; tal es el caso de las penínsulas del Fangar y Alfaques, o del Garxal, Illas de San Antoni o Buda.



Figura 7.14: Dominio Público Marítimo Terrestre del Delta del Ebro (Fuente: MAPAMA)

SUMIDERO NORTE (S_{NORTE}): PLAYA DEL ARENAL Y PUERTO DE ILLA DEL MAR

En esta zona los efectos más importantes son los retrocesos debidos a la subida del nivel del mar y subsidencia; algo menor es el debido a temporales en la playa del Arenal, evaluable, por ejemplo en 30 m; mientras que en el interior de la bahía del Fangar es cero.

Anchura de resguardo:

- Playa del Arenal: $\Delta X_{\text{Total}} = 30 + 160 + 40 = 230 \text{ m}$

– Interior bahía del Fangar: $\Delta X_{\text{Total}} = 160 + 40 = 200 \text{ m}$

Altura de berma: $B_{\text{min}} = 0,006 \cdot 230 + 1,43 + 0,87 + 0,24 = 1,38 + 2,54 = 3,92 \text{ m}$

Altura de mota o duna = 2,54 m

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería de 2.371.111 m² (Figura 7.15).

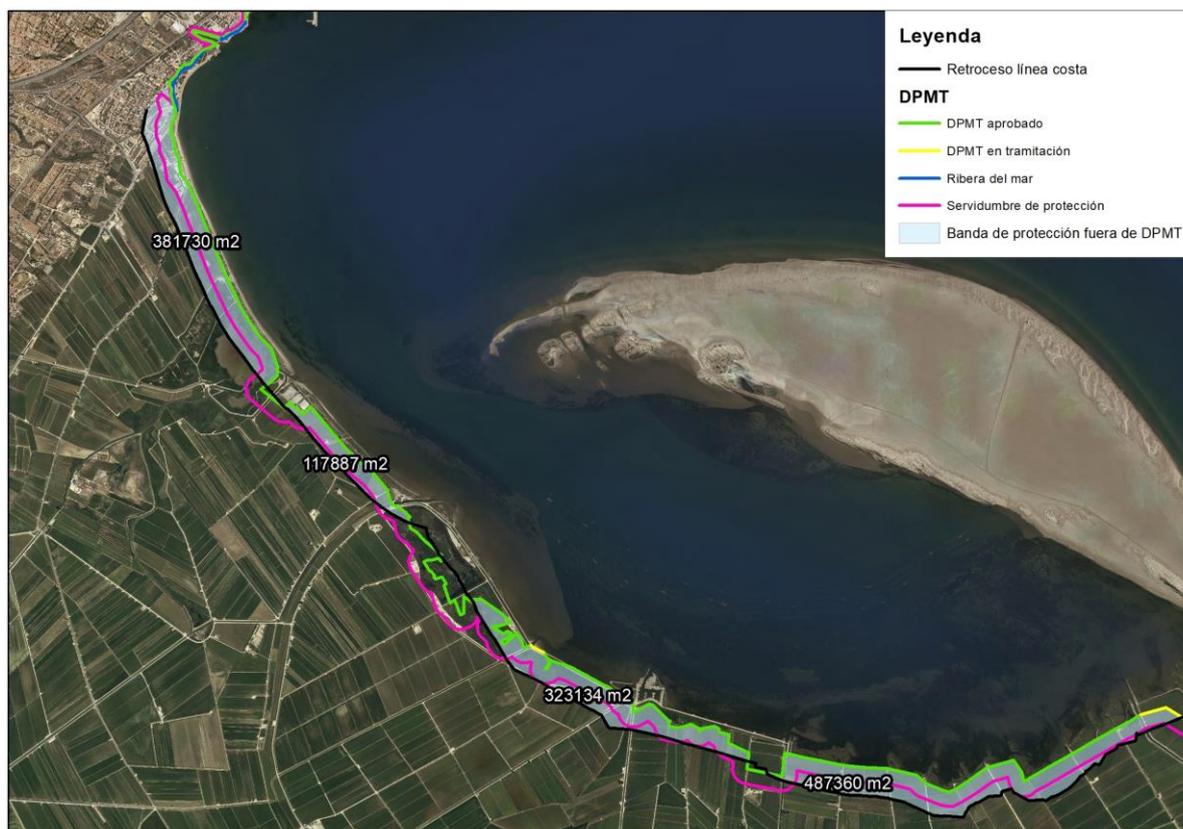


Figura 7.15: Banda de protección zona del Sumidero Norte (Foto: PNOA)

Z₁: FANGAR

Toda esta península es un arenal perteneciente al dominio público por lo que no es necesario realizar banda alguna. Se produce en ella una gran descompensación, muy visible en el último periodo estudiado de 2015-2018, donde en la punta se observa un crecimiento de 309 m y en el arranque un retroceso de 34 m (Figura 7.16) que es similar a la tendencia que se ha visto desde 1956 (Figura 7.17).

La península es totalmente vulnerable con ascensos esperables del nivel del mar y un lugar natural de formación de dunas que desaparecen por arrastre del mar hacia la bahía en estos eventos.

El avance de la flecha, o extremo de la península amenaza con el cierre de la bahía; por lo que este extremo norte sería un lugar apto para dragar, si las condiciones medioambientales lo permiten, periódicamente, evitando en gran medida la colmatación y cierre de la bahía.

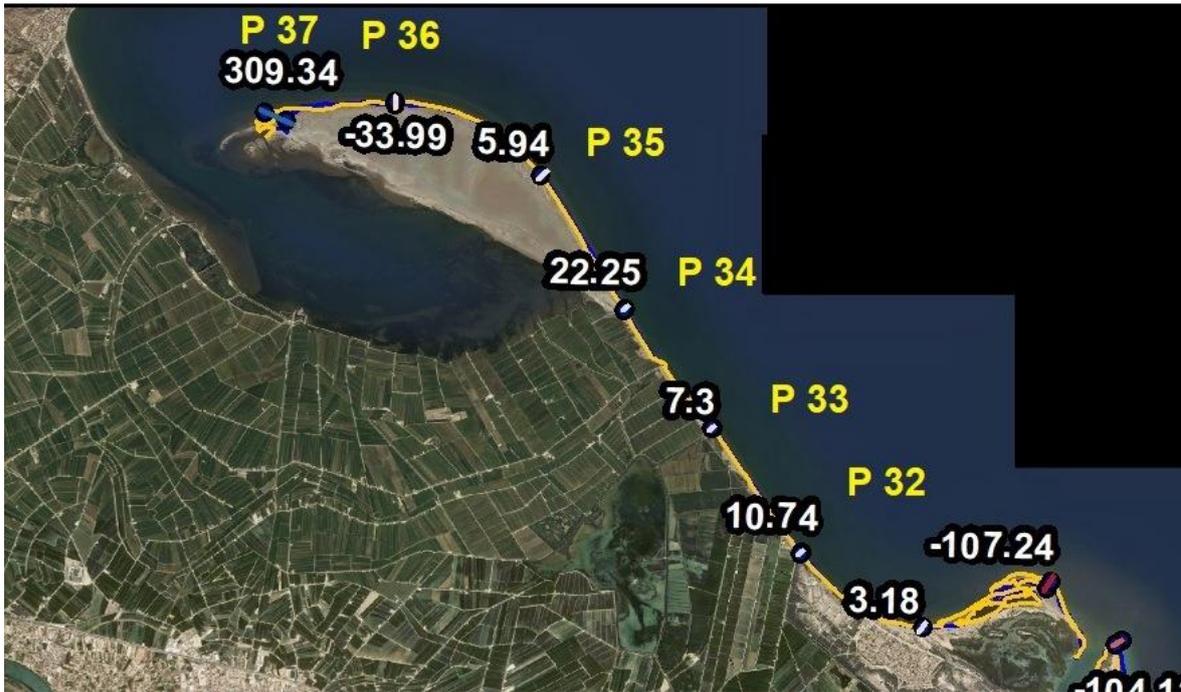


Figura 7.16: Variación de la línea de costa en el hemidelta norte entre 2015 y 2018 (Foto); en los perfiles usados por el LIM (Figura 4.39) (Foto: PNOA)

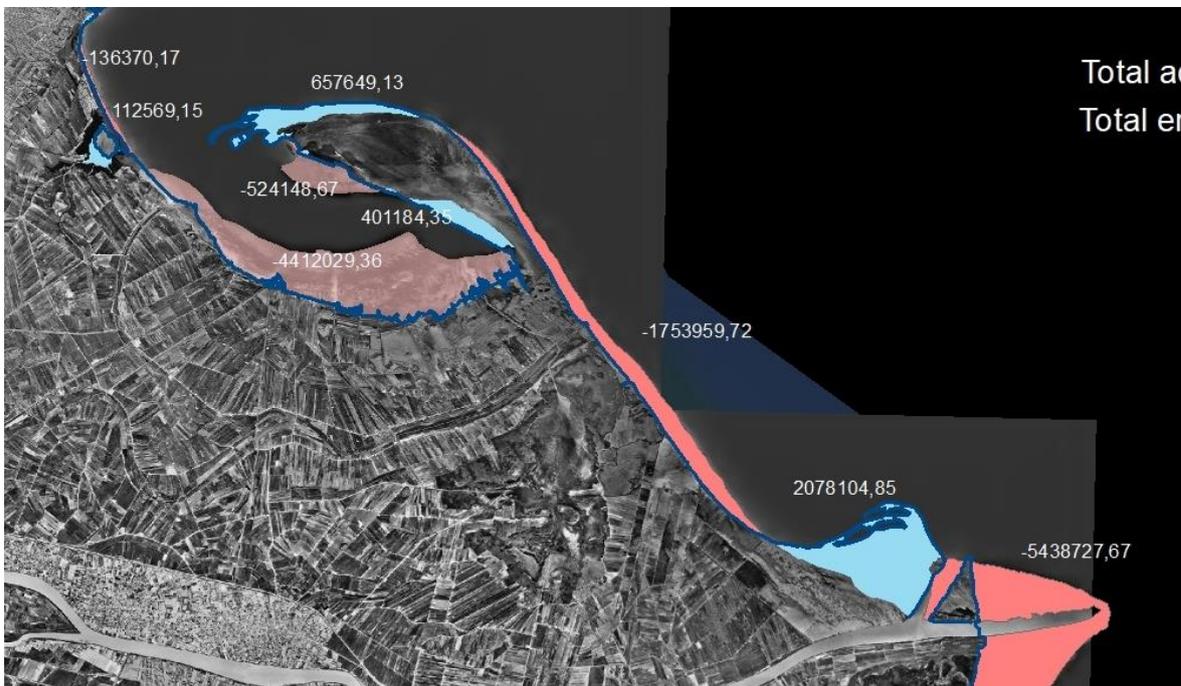


Figura 7.17: Variación de la superficie en el hemidelta norte desde 1956 (Foto) a 2018 (Fuente: IGN)

Z₂: EXTREMO ESTE DE LA PENÍNSULA DEL FANGAR Y PLAYA DE LA MARQUESA

Este tramo lo forman (Figura 7.5 y 7.7): el extremo este de la península del Fangar, la playa de la Marquesa, la playa de la Balsa de Arena y la playa de Riumar; aunque ésta se analiza en la zona siguiente (Z₃).

La banda de protección para cada una de ellas sería:

- Playa del Fangar: En esta playa no es necesaria banda de protección
- Playas de la Marquesa y Balsa de Arena:

$$\Delta X_{\text{Total}} = 108 + 236 \text{ (erosión media)} + 170 + 40 = 554 \text{ m}$$

Si se efectuase un trasvase entonces la cantidad erosiva se podría reducir y también la anchura de la franja, con un valor mínimo de:

$$(\Delta X_{\text{Total}})_{\text{trasvase}} > 108 + 170 + 40 = 318 \text{ m}$$

La altura de berma se mantendría, sin tasa erosiva, en:

$$B_{\text{min}} = (0,69 \pm 0,36) + 1,43 + 0,87 = 3,26 \pm 0,36 = 3,62 \text{ m}$$

Por lo que tendría que proyectarse una duna de al menos 1,60 m de altura sobre la berma.

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería (Figura 7.18): 2.158.514 m².



Figura 7.18: Banda de protección Zona 2 (Z₂) (Foto: PNOA)

Z₃: PLAYA DE RIUMAR Y GARXAL

En general esta zona hay crecimiento, aunque en el último periodo se produjo un retroceso, quizás debido a la reordenación de bajos.

La zona del Garxal es pública (Figura 7.14) por lo que no es necesario realizar banda de protección. No es así en Riumar, donde solamente se consideran avances debido a la subida del nivel del mar, la subsidencia y, en menor medida, los temporales; debido a la protección que le da el Garxal este sumando se ha reducido a la mitad, en una primera aproximación que debe contrastarse con cálculos más precisos, resultando:

$$\Delta X_{\text{Total}} = \frac{1}{2} 108 + 170 + 40 = 264\text{m}$$

$$B_{\text{min}} = (\frac{1}{2} 0,69 \pm 0,36) + 1,43 + 0,87 = 2,64 \pm 0,36 = 3\text{ m}$$

Por lo que sería necesario elevar la berma:

$$D = 3 - 0,006 \cdot 264 = 1,42\text{ m}$$

Por tanto, esta banda de protección afecta a la zona urbana (Figura 7.19).

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería (Figura 7.19): 583.534 m².



Figura 7.19: Banda de protección Zona 3 (Z₃) (Foto: PNOA)

Z₄: ILLA DE SAN ANTONI (A) E ILLA DE BUDA (B)

Ambos lugares son de titularidad pública, por lo que, en principio no habría que realizar banda de protección; si bien, el retroceso esperado en ellas hace que todo el conjunto tienda a colapsar en el futuro ya que el retroceso medio esperado es de casi 1300 m (Tabla 7.5).

Estas zonas, en especial la Illa de Buda, tienen especial interés medioambiental; albergan una riqueza natural importante a proteger, y ello obliga a mantener una franja de protección con una cierta estabilidad en el tiempo, lo que implica la necesidad de una reposición de la arena que pueda erosionarse para evitar que el conjunto colapse.

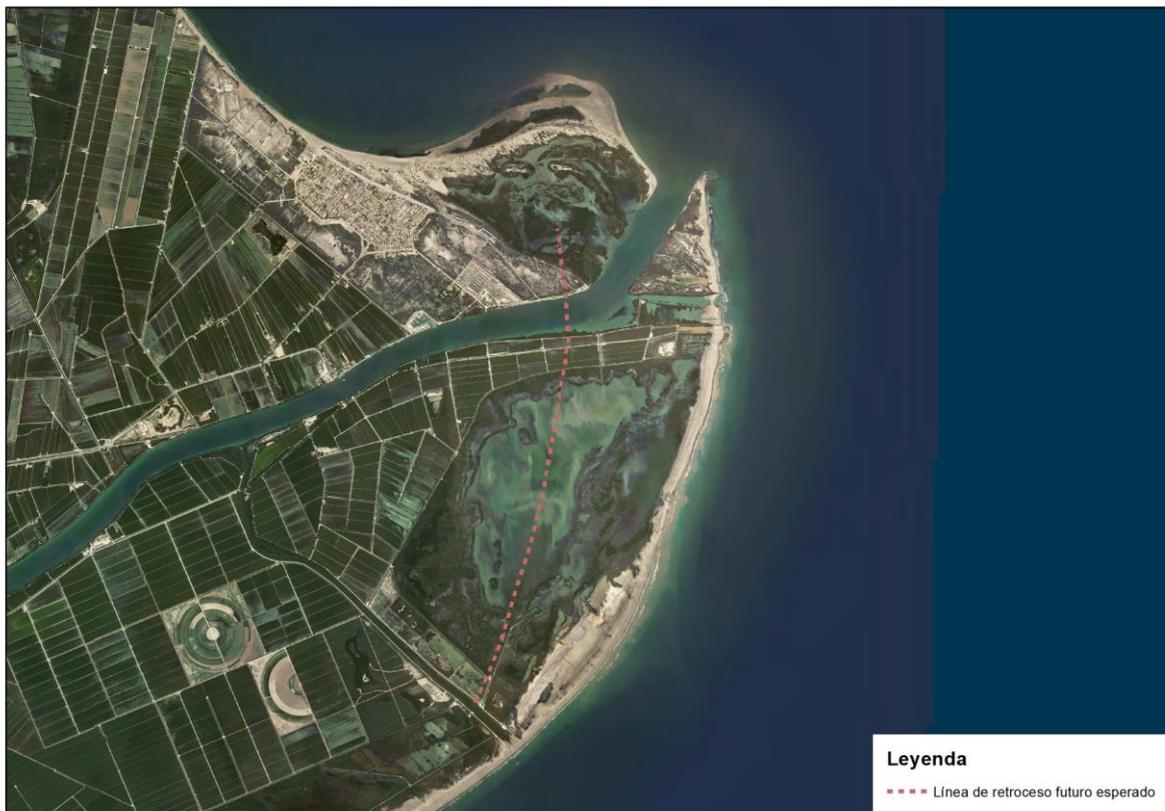


Figura 7.20: Línea de retroceso futuro esperado zona 4 (Z₄) (Foto: PNOA)

La zona sur, tras Illa de Buda, zona conocida como La Alfacada, que formalmente se encuentra en la zona Z₅ al sur de la gola Migjorn, la banda litoral sería:

$$\Delta X_{\text{Total}} = 108 + 242 + 170 + 40 = 560 \text{ m}$$

Si se efectuase un trasvase entonces la cantidad erosiva se podría reducir y también la anchura de la franja, con un valor mínimo de:

$$(\Delta X_{\text{Total}})_{\text{trasvase}} > 108 + 170 + 40 = 318 \text{ m}$$

La altura de berma mínima necesaria sería:

$$B_{\text{min}} = (0,69 \pm 0,36) + 1,43 + 0,87 + 0,24 = 3,23 \pm 0,36 = 3,59 \text{ m}$$

Y la altura de berma natural es de:

$$(\Delta X_{\text{Total}})_{\text{travase}} \cdot m = 318 \cdot 0,006 = 1,91 \text{ m}$$

Por lo que tendría que proyectarse una duna de al menos $D = 3,59 - 1,91 = 1,68 \text{ m}$ sobre la berma, algo superior a la planteada por Galofré et al. (2012).

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería (Figura 7.21): $1.159.913 \text{ m}^2$.

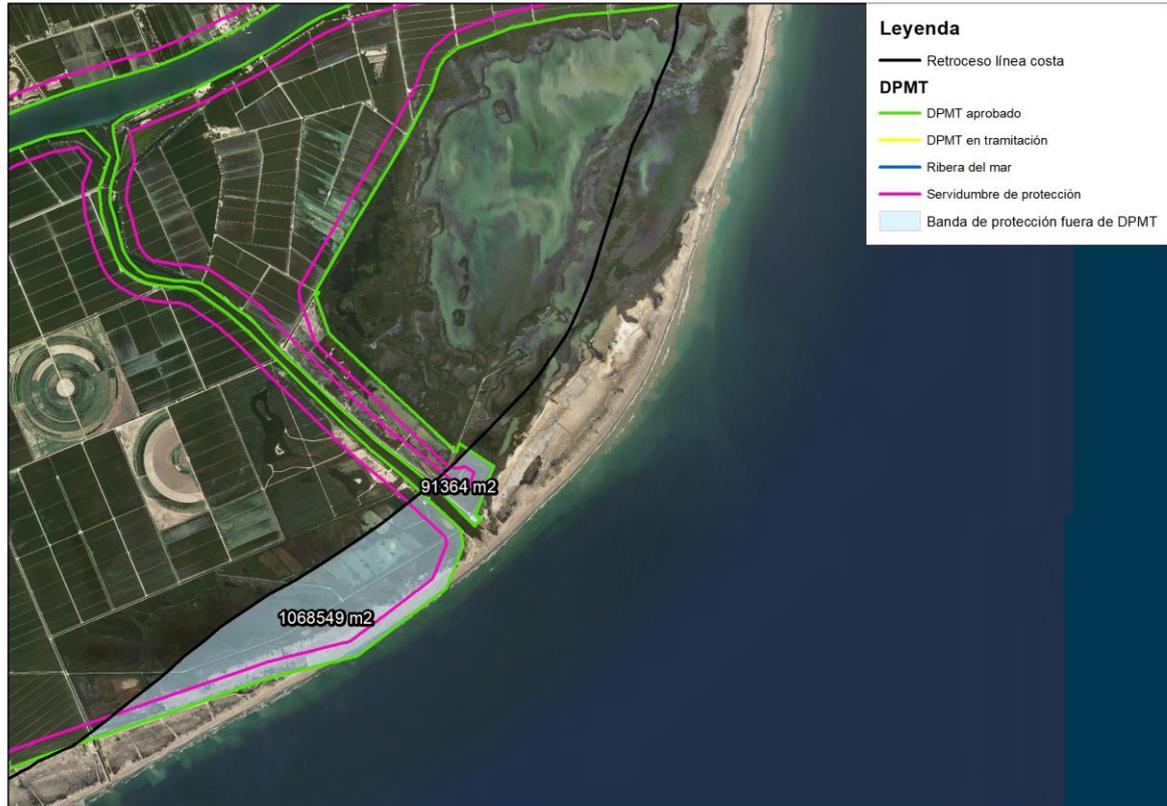


Figura 7.21: Banda de protección zona 4 (Z_4) y norte de Z_5 (Foto: PNOA)

Z_5 : EUCALIPTUS

Corresponde a las playas al sur de la: playas del Serrallo, de los Eucaliptus y de L'Aluet. En el último periodo estudiado de 2015 a 2018 el tramo ha experimentado un crecimiento neto, pero con pequeños retrocesos en algunas zonas (Figura 7.22). Sin embargo, entre 1956 y 2018 se ha comportado como una costa en acreción (Figura 7.23). Por lo tanto, para analizar las necesidades de una franja de protección se tomará como referencia este periodo más amplio.

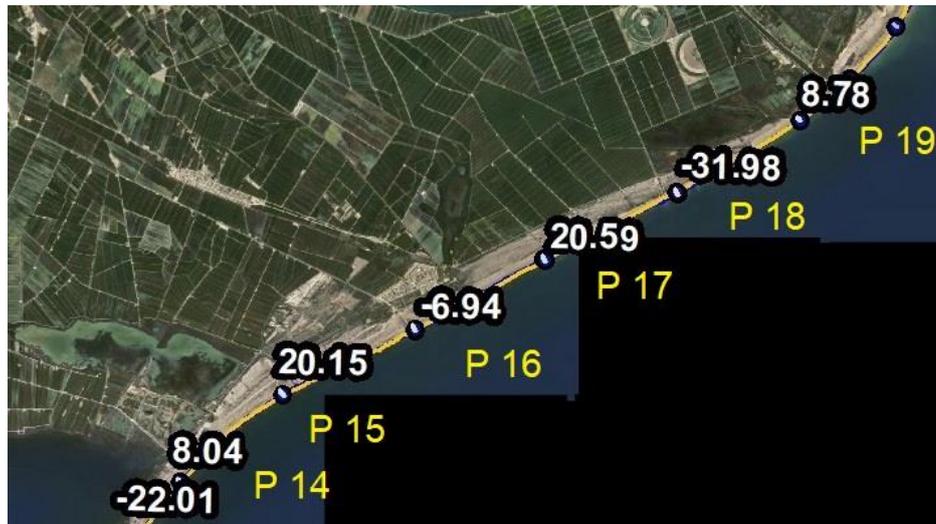


Figura 7.22: Variación de la línea de costa en la zona de Eucaliptus entre 2015 y 2018 (Foto); en los perfiles usados por el LIM (Figura 4.39) (Foto: PNOA)

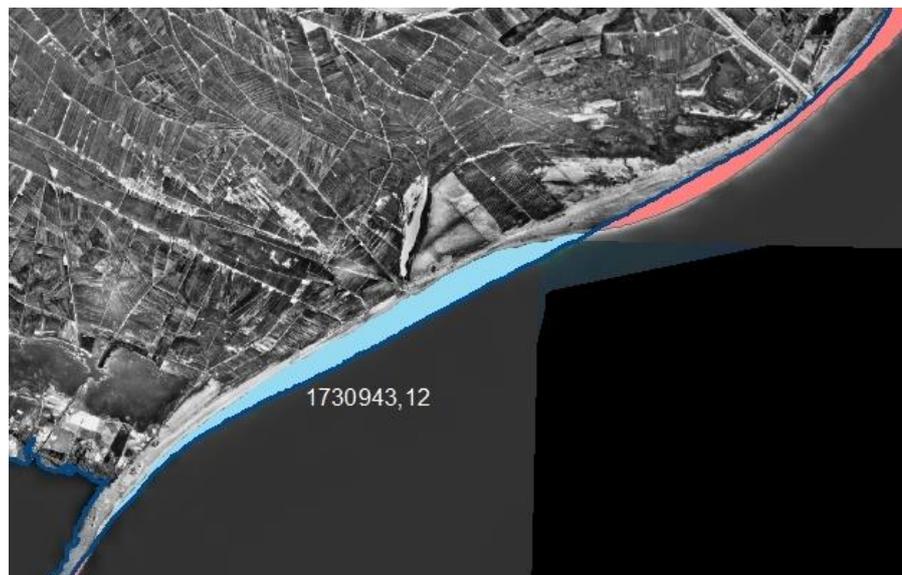


Figura 7.23: Variación de la superficie en el hemidelta norte desde 1956 (Foto) hasta 2018 (Fuente: IGN)

La anchura de banda de protección proyectada en esta zona, descontando el tramo norte unos 1.500 m (Alfacada) que se ha diseñado y calculado en el apartado anterior, de unos 8.000 m de longitud sería:

$$\Delta X_{\text{Total}} = \Delta X_{\text{tem}} + \Delta X_{\text{erosión}} + \Delta X_{\text{RSL}} + \Delta X_{\text{Sb}} = 108 + 0 + 170 + 40 = 318 \text{ m}$$

El avance mínimo (Tabla 7.5) sería de 512 m en 2100, superior incluso al ancho de la franja de protección. Además, la anchura media actual de playa en este tramo se encuentra en el entorno de 370 m que excede de la anchura de la banda de protección necesaria en algo más de 50 m.

Si se pensase en el futuro (horizonte de 2100) el avance esperado mínimo sería de 512 m que unido a los 50 m actuales de excedente de banda sería: 562 m lo que supone que se acumularía, como mínimo un volumen potencial en 80 años de: $562 \times 8.000 \times 5,4 \text{ m (PdC)} = 24.278.400 \text{ m}^3$; lo que supondría un excedente anual de: $303.480 \text{ m}^3/\text{año}$ que potencialmente podría usarse como volumen para los trasvases propuestos como posible actuación para el control de la evolución del Delta.

La altura de berma mínima necesaria sería:

$$B_{\min} = \text{Setup} + \text{MM} + \text{RSL} + \text{Sb} = (0,69 \pm 0,36) + 1,43 + 0,87 + 0,24 = 3,23 \pm 0,36 = 3,59 \text{ m}$$

Y la altura de berma natural es de:

$$(\Delta X_{\text{Total}}) \cdot m = 318 \cdot 0,006 = 1,91 \text{ m}$$

Por lo que tendría que proyectarse una duna de: $D = 3,59 - 1,91 = 1,68 \text{ m}$

Habría que ajustar las líneas de DPMT en los extremos norte y sur del tramo; pero no en el resto.

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería (Figura 7.24): 14.110 m^2 .



Figura 7.24: Banda de protección zona 5 (Z₅)



Z₆: TRABUCADOR

Toda la barra del Trabucador es de dominio público (Figura 7.14); por lo que no sería necesario proyectar banda de protección alguna; solamente habría que tener en cuenta que la falta de sedimento que llega a ella, la debilita paulatinamente y, en eventos especiales que en el futuro serán frecuentes, se agravará más; dejándola bajo el agua en determinados momentos, cada vez más habituales.

La barra conecta el cuerpo del Delta con la península de la Banya; sobre ella se sitúa una carretera de conexión que sirve de servicio a la explotación salinera. Esta infraestructura rígida choca con el comportamiento natural flexible de la barra, lo que puede agravar su comportamiento en eventos extremos y en su recuperación tras ellos. En este contexto tendría que pensarse en una alternativa a ella (camino de tierra, transporte de sal por mar, traslado de la explotación, etc.).

También, desde el punto de vista medioambiental y la protección de especies como la nacra, sería conveniente evitar las roturas de esta barra, cuya frecuencia ha ido aumentando, reduciendo su fragilidad y frenando su estado erosivo mediante la reposición de arena manteniendo una continuidad de caudal sólido respecto mediante trasvases de arena.

Z₇: PENÍNSULA DE LA BANYA

Toda ella es de dominio público, aunque contiene una concesión salinera; por lo que no sería necesario realizar determinar la banda de protección. La situación de la barra del Trabucador hace que se encuentre aislada de tierra que se hará más habitual a medida que pase el tiempo.

La descompensación sedimentaria hace que se erosione en la zona NE y se acrecente en la zona SW; quizás interfiriendo con la navegabilidad de los puertos de San Carles de la Rápita y embarcadero de Alcanar. Esta circunstancia le hace a esta última zona como propicia para ser un punto de toma de sedimento para retro trasvase.

SUMIDERO SUR (S_{SUR}): BAHÍA DE LOS ALFAQUES

En esta zona los efectos más importantes son los retrocesos debidos a la subida del nivel del mar y subsidencia; no afectando el debido a temporales.

Anchura de resguardo:

- Interior bahía de los Alfaques: $\Delta X_{\text{Total}} = 160 + 40 = 200 \text{ m}$

Altura de berma: $B_{\text{min}} = 1,43 + 0,87 + 0,24 = 1,38 + 2,54 = 2,54 \text{ m}$

Altura de berma playa: $0,006 \cdot 200 = 1,2 \text{ m}$

Altura de mota o duna = $2,54 - 1,2 = 1,34 \text{ m}$

Algo inferior, pero similar, a la proyectada por Galofré et al. (2012).

La superficie que tendría que pasar a dominio público sería (Figura 7.25): 2.033.065 m².



Figura 7.25: Banda de protección zona del Sumidero Sur (Foto: PNOA)

El total de superficie que tendría que pasar a dominio público sería: 8.320.547 m².

7.3.3.2 Traslases de arena de las zonas de depósito a las zonas erosivas

El proceso natural actual, con las condiciones de desarrollo y explotación de la cuenca del Ebro y su delta, hace que se produzcan transformaciones en la configuración morfológica de la llanura deltaica y en las formaciones asociadas de su estado natural primitivo. La evolución natural actual esperable hace que se tienda a crear tres zonas que pueden colapsar, provocando transformaciones bruscas, en tres puntos de ella: Bahía del Fangar, Desembocadura y Barra del Trabucador.

En el primero de los casos, Bahía del Fangar, su situación se produce por exceso de sedimento que alcanza la península del mismo nombre; con una reducción importante y paulatina de la anchura del canal que conecta ésta con el mar exterior en L'Ampolla. Si se deja evolucionar como hasta el momento, su futuro más probable es convertirse en una laguna litoral sin conexión con el mar. Para evitar esta situación, cuyas alternativas de actuación se han analizado en el capítulo anterior, se propone realizar un trasvase de arena desde la zona de depósito (punta del Fangar) hacia dos puntos: 1) Playas de la Marquesa y Balsa de Arena; 2) Desembocadura (Illas de Sant Antoni y Buda). El esquema general de esta actuación se presenta en la Figura 7.26. La cantidad a trasvasar y su frecuencia debe ser objeto de un trabajo específico que diseñe esta propuesta de actuación; pero siempre tiene que ser acorde con los resultados obtenidos en el balance sedimentario (apartado 4.3), al objeto de no alterarlo.



Figura 7.26: Esquema del trasvase propuesto desde la punta del Fangar hacia la desembocadura (Foto: Google Earth)

Yendo hacia el sur, la desembocadura actual se formó hace casi 100 años, lo que ha provocado las descompensaciones sedimentarias ya expuestas (apartados 4.1, 4.2, 4.3, 6.3 y 6.4). Entre sus efectos destaca la reducción paulatina de la longitud del cabo Tortosa (LIM, 2000 y 2011; IHAC, 2011; IHAC y LIM 2012), cuya distancia actual al cauce del río es de 800 m. Con la tasa erosiva o de retroceso determinada en los informes citados, para el año 2100, el retroceso esperado de este cabo (Tabla 7.5) estaría en una horquilla entre 550 a 2.046 m, con una media de 1.298 m.

Con esa perspectiva, la desembocadura actual se vería muy alterada, desapareciendo la isla de Sant Antoni y gran parte de la Illa de Buda, debiéndose conformar una desembocadura nueva en la zona de Riumar. Todos estos problemas dan pie a que se proponga un doble trasvase, uno procedente de la punta del Fangar (expuesto más arriba) y otro con el excedente de sedimento detectado en Eucaliptus y en la punta de la Banya (Figuras 7.26 y 27). Como en el caso anterior, la cantidad a trasvasar y su frecuencia debe ser objeto de un trabajo específico que excede a este Plan; pero siempre tiene que ser acorde con los resultados obtenidos en el balance sedimentario (apartado 4.3).

Este movimiento de arena hacia la Illa de Buda mediante trasvases, tanto desde la Punta del Fangar (Figura 7.26) como de la zona de Eucaliptus (Figura 7.27) tiene como objeto prioritario mantener y defender un área con valores naturales de excepcional interés.



Figura 7.27: Esquema de los trasvases propuesto desde Eucaliptus hacia la Illa de Buda y desde la punta de la Banyà hacia el Trabucador (Foto: Google Earth)

El tercero de los puntos donde una parte del Delta puede verse muy alterado es la barra del Trabucador, tal como se ha comentado en los apartados anteriores, con consecuencias medioambientales importantes. Esta alteración se podría reducir significativamente mediante un trasvase periódico depositando la arena al norte del Trabucador y al sur de la playa de L'Aluet (Figura 7.27), con las mismas consideraciones expuestas anteriormente en relación con cantidades, frecuencia y metodología a seguir.

Todas estas propuestas de trasvases podrían requerir de estrategias para la retención de arena para aumentar su eficacia y evitar la entrada de arena en las bahías, si bien en un entorno natural como es el Delta del Ebro, con una dinámica litoral tan activa, podrían tener muchos impactos negativos, por lo que su situación, necesidad y diseño debe evaluarse en proyectos específicos.

OBRAS AUXILIARES

Los trasvases propuestos pueden requerir, para aumentar su eficacia y evitar la entrada de arena en las bahías, de obras de retención de arena, cuya idoneidad, situación y diseño debe evaluarse en proyectos específicos.

7.4 DESARROLLO TEMPORAL DE LAS ACTUACIONES

Las propuestas de actuación que se presentan en este documento persiguen garantizar la estructura exterior del Delta, sin que se produzcan riesgos de inundación, salvo en eventos excepcionales, ni consecuencias negativas a bienes debido a la citada inundación o a los efectos de la erosión producida localmente por un balance sedimentario negativo. Estas actuaciones pueden materializarse con intervenciones muy poco frecuentes (*"Principio de precaución"* en la Figura 7.28) o espaciadas en el tiempo a medida que la costa se aproxime a un umbral de riesgo evidente y no aceptable (*"Adaptación flexible"* en la Figura 7.28).

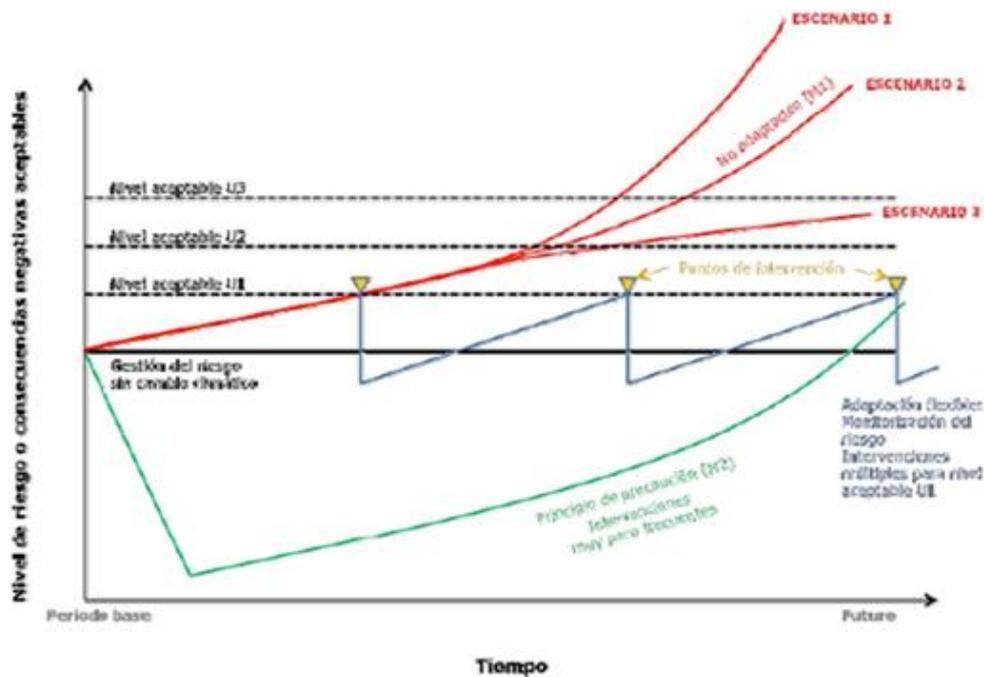


Figura 7.28. Esquema de las diferentes modalidades de actuación: Principio de precaución vs. Adaptación flexible

En el informe parcial se ha supuesto que la adaptación se realizará siguiendo el principio de precaución, en un escenario de emisiones pesimista (RCP 8.5) y para el horizonte 2100. Se propone, por tanto, un conjunto de actuaciones poco frecuentes, lo cual hace que tengan una gran magnitud, con anchuras muy amplias especialmente en lo relativo al control del riesgo de erosión costera y retroceso de la línea de orilla como consecuencia de la subida del nivel del mar.

En caso de optar por la adaptación flexible las intervenciones se deben realizar a medida que la erosión se vaya originando y en el mismo grado se produzca la sedimentación en otro punto. De la misma manera, la subida del nivel del mar será progresiva, como lo será el aumento del riesgo asociado a ella y la presión sobre la costa y, con ello, la necesidad de un aumento de franja costera libre que lo permita sin un riesgo aceptable. Todo ello implica la realización sistemática de un seguimiento de toda la costa y continuo análisis de los niveles de riesgo existentes. Este seguimiento es esencial también a la hora de determinar las cantidades de arena a reponer mover y verter de un punto a otro de la costa del Delta.



8 RESUMEN, CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE ACTUACIONES

8.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES

El Delta del Ebro es uno de los grandes deltas de mundo y en particular de la cuenca mediterránea, junto a deltas como el del Nilo, Po o Ródano. Está constituido por depósitos provenientes del río que se han ido acumulando en su desembocadura a lo largo del tiempo, con un nivel bajo respecto a la superficie del mar, lo cual hace que sea muy vulnerable frente a las amenazas que suponen la subida de este, bien como consecuencia del cambio climático, las mareas meteorológicas, los temporales de oleaje, etc.; bien por el asentamiento, subsidencia, que tiene por compactación de las capas del terreno que lo forma.

Un delta es una acumulación de sedimento que rebasa la orilla primitiva de la desembocadura de un río debido a que la acción directa del oleaje no ha sido capaz de distribuir el sedimento que aporta el cauce mediante el transporte sólido litoral a lo largo de la costa a un lado y otro de la salida del río. Por tanto, el delta no deja de ser un depósito “temporal” de sedimento cuyo destino más probable es ser redistribuido por el mar a lo largo de la costa adyacente.

Sin embargo, cuando la acumulación de sedimento crece y se mantiene en el tiempo, es frecuente que se utilice para fines y usos humanos, habitualmente agrícolas. Es decir, la citada temporalidad no siempre se percibe por el ser humano y con el tiempo el delta se convierte, de cara a su visión y los usos que le da al delta, como un elemento estático y rígido que tiende a preservar sin considerar los procesos naturales que lo conformaron y que lo condicionan. No obstante, esto le confiere al delta un valor social y económico evidente que se ha enraizado con el tiempo.

En conclusión, el delta es, por un lado, una morfología costera con una naturaleza dinámica, y por otro lado un espacio socioeconómico, de carácter estático (se basan en la ocupación y utilización del suelo). Ambas situaciones interactúan de forma compleja y son difícilmente compatibilizar, por lo que en muchas ocasiones las actuaciones necesarias para proteger el Delta deben decantarse por una de las dos opciones, es decir, por qué tipo de Delta se quiere tener en el futuro.

La magnitud del presente trabajo hace necesario establecer una metodología basada en aproximaciones sucesivas, incluyendo discusiones técnicas, decisiones orgánicas y sociales, que hacen necesario un primer borrador técnico en el que se pudiese exponer tanto el escenario social y geográfico del Delta del Ebro como el análisis técnico de los diversos procesos costeros que en él tienen lugar. Por ello, la estructura formal de este informe incluye, por un lado, un análisis exhaustivo de los estudios, informes y trabajos técnicos relacionados con la costa del Delta del Ebro, complementado con nuevos datos que se hayan obtenido específicamente en este trabajo; con ello se obtiene un conocimiento del comportamiento actual del Delta del Ebro y sus problemas, así como el de diversos escenarios futuros en los que se destaca la importancia de la subida del nivel del mar debida al cambio climático. Por otro lado, con estos datos se plantea un conjunto de propuestas de actuación encaminadas a solucionar o contener los problemas detectados.

Antes de enumerar las diversas conclusiones a las que se ha llegado, resulta necesario hacer una serie de advertencias:



- El Delta del Ebro es una unidad morfológica dinámica y frágil; eso la hace vulnerable frente a los agentes climáticos naturales, y esa vulnerabilidad es cambiante con el tiempo y con las acciones humanas que sobre él actúan. Lo que obliga a que todo el sistema natural deba estar sometido a un seguimiento continuo, a un control y a una protección adecuada en el tiempo.
- Hasta el momento, parece que el Delta del Ebro y sus costas lo formaba el frente directamente afectado por el oleaje, pero eso no obedece a la realidad. El tratamiento de esta unidad debe ser total, abarcando todo el sistema litoral, que incluye las bahías del Fangar y los Alfaques.

Si se comienza por las cuestiones relativas a la dinámica sedimentaria del Ebro, la fuente aportadora de sedimento que forma el Delta, de los datos analizados se concluye:

1. Existe una gran incertidumbre respecto al comportamiento sedimentario del cauce bajo próximo a la desembocadura (apartado 4.1.1).
2. La aportación media de arena del río al mar se considera que está actualmente en el entorno de 30.000 m³/año (apartado 4.1).
3. La actual tasa de sedimentación del embalse de Mequinzenza se estima en 4,36. 10⁶ t/año, equivalente a 3,87 hm³/año. Se calcula que de los 40,2 hm³ de sedimento que existen en este tramo, 10,67 hm³ son de arena y 3,73 hm³ son de grava. (apartado 3.1.6)
4. Existe una gran dificultad de extracción de arenas de los embalses que retienen el sedimento del río (apartados 3.3, 4.1 y 6.3.1). Esto hace que dicho material sólo pueda considerarse una alternativa subsidiaria de aporte, pero no la fuente principal. El balance medioambiental de la explotación de los sedimentos embalses es claramente desfavorable como se ha expuesto en este informe técnico.

Respecto a la dinámica litoral y balance de sedimentos:

5. En la zona exterior del delta hay dos áreas de depósito por cada uno de los hemideltas. Al Norte, junto a la desembocadura y en la península del Fangar; al Sur, en la playa de Eucaliptus y en la zona sur de la península de la Banya (Apartado 4.3).
6. Hay un importante desconocimiento de los sumideros del Delta, tanto de la bahía del Fangar-L'Ampolla como de la bahía de los Alfaques, en la cual además residen los condicionantes portuarios y de dragado en ellos que hace imposible concluir con un balance sedimentario completo con una cierta exactitud (apartado 4.3.4).
7. La costa exterior del Delta tiene un balance sedimentario claramente negativo que se ha ido incrementando en los últimos años (apartado 4.3). De las tablas 4.14 y 4.15 se desprende que existe un déficit de sedimentos en la costa del Delta que se situaría en una horquilla entre 180.000 y 519.000 m³/año; con una distribución que tendría una relación Hemidelta norte/Hemidelta sur de 1/3. Por lo que la horquilla de pérdidas se situaría:

-45.000 a 130.000 m³/año (hemidelta norte)



-135.000 a 389.000 m³/año (hemidelta sur)

Los efectos más importantes que pueden producirse en el Delta del Ebro respecto la subida del nivel del mar debido al cambio climático, si no se actúa, son:

8. Los temporales que producen inundación de la plataforma deltaica y rotura de las barras del Trabucador e Illa de Buda tienden a incrementarse con el tiempo.
9. Las barras de Illa de Buda y Trabucador se verán seriamente amenazadas en 2040 y pueden desaparecer en 2060.

Los problemas existentes en el Delta pueden ser de índole global (apartado 6.4.1), que afectan en conjunto a todo el Delta; y parcial, que afectan a una parte de él (apartado 6.4.2).

10. Los problemas globales detectados son:

- a. Falta de aportes de sedimentos
- b. Descompensación en la distribución de sedimentos
- c. Falta de control de sumideros
- d. Inundaciones de la plataforma deltaica

Para abordar las diferentes alternativas que se posee para solucionar los problemas globales se ha optado por aplicar dos criterios:

- I. Seguir las opciones generales dadas en el apartado 6.2 sobre tipo de actuaciones; considerando tres alternativas generales posibles:
 - a. Acomodación al cambio, para lo cual caben dos posibilidades:
 - i. Dejando libertad a los procesos costeros
 - ii. Controlando los procesos erosivos
 - b. Protección frente a las transformaciones del medio y agentes:
 - i. Rigidizando
 - c. Retirada:
 - i. Reubicando actividades dejando que los procesos y medios actúen libremente
- II. Para cualquiera de los dos primeros casos (acomodación o protección) se necesita una subida efectiva de la berma o cota de la estructura que compense la subida del nivel del mar y la subsidencia en, al menos, la vida útil de la obra.

En conjunto se pueden observar dos tipos de problemas parciales: Los que corresponden a ocupaciones o presiones sobre el territorio y el dominio público marítimo terrestre; y aquellas que afectan a la calidad de medioambiente.

Alternativas de actuación sobre los problemas de ocupaciones o presiones sobre el territorio se analizan en dos contextos diferentes: Urbano y agrario.

La ordenación de las playas y sus servicios son simples elementos auxiliares en los que sus alternativas de actuación dependen más de la actividad turístico recreativa que se quiera



promocionar que de la propia evolución, que en todo momento puede adaptarse a ésta al ser los elementos que la componen flexibles.

Las alternativas de actuación para mitigar estos problemas que afectan a la franja litoral, son en su mayoría de gestión de residuos provenientes de la actividad agrícola. Sus soluciones deben tender a un vertido cero de fangos a las bahías.

8.2 PROPUESTA DE ACTUACIONES

La propuesta de actuaciones a realizar en la costa del Delta del Ebro (Apartado 7.2) tiene los siguientes principios de actuación:

1. Acomodarse/Adaptarse al medio y sus agentes: evolución natural (Dinámica)
 - Dejando actuar a los procesos: evolución natural libre, y adaptándose a ellos sin abandono del Delta
 - Cuando ello sea posible o se considere necesario para aumentar la eficiencia de la principal actuación propuesta, se podrán revertir los procesos erosivos, recirculando el sedimento en el Delta, llevándolo desde las zonas en acreción a las zonas en erosión.
2. Evitar defensas costeras rígidas (espigones, muros, etc.).
3. Las acciones estén encaminadas a evitar y eliminar en lo posible la descompensación sedimentaria entre el Hemidelta norte y el Hemidelta sur.
4. Protección transversal frente a la inundación; garantizando una cota de berma, duna o frente costero que evite los rebases de oleaje, teniendo en cuenta la previsión de la subida del nivel del mar y la subsidencia natural del frente deltaico.
5. Protección frente a las erosiones que pongan en peligro tanto a personas, como bienes y unidades morfológicas de interés natural.
6. Garantizar el mantenimiento de la actividad económica, en muchos casos deberá adaptarse a la nueva realidad.

Se pueden desglosar en las siguientes actuaciones:

1. Confección de un nuevo deslinde incorporando los terrenos que tengan características de Dominio Público.
2. Realización de una franja de protección que permita el libre movimiento de la costa; siendo de plena validez las soluciones apuntadas por el LIM (2011 y 2018); si bien debe contemplarse la elevación de berma que tenga en cuenta los horizontes de elevación del nivel del mar. Los valores de las anchuras de estas franjas se han calculado en el apartado 7.3 y se resumen en las Figuras 7.15, 18, 19, 20, 21, 24 y 25. Estará formada por la actual zona de DPMT y una franja de anchura necesaria para la libre evolución de las playas a adquirir como terrenos públicos.
3. Como actuación adicional, ejecución de cuatro posibles trasvases, dos en cada hemidelta (Figuras 7.26 y 7.27):



CEDEX

- I. Punta del Fangar a playas de La Marquesa y Balsa de Arena, hasta el límite erosivo.
 - II. Punta del Fangar y/o Garxal-Riumar a Cabo Tortosa-Illa de Sant Antoni.
 - III. Playa de Eucaliptus a Illa de Buda u Cabo Tortosa.
 - IV. Punta de la Banya a norte de la playa del Trabucador
4. En caso de realizar la anterior actuación, podría ser conveniente construir diversos elementos de control y retención de arena antes de la entrada en los sumideros (bahías), en la punta del Fangar y la punta de la Banya. Un estudio específico debe determinar cuál es la alternativa más adecuada.

Madrid, febrero de 2021



Apéndice: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- ACA (2009). "Balance de sedimentos del tramo final del río Ebro. Documento preliminar"; Agencia Catalana del Agua, enero 2009.
- 2- Bailard, J.A. (1981). "An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach"; Journal Geophysical. Research, 86(C11), pp. 10938-10954.
- 3- Balada, R., A. Espanya, A. Martínez Vilalta, J. Martí, I. Juan, A. Canicio y X. Ribas, (1997). "El Delta del Ebro"; Ediciones Jaguar. Libro editado en colaboración con Diputación de Tarragona.
- 4- Barrio-Parra, Fernando, Inmaculada Rodríguez-Santalla, Rui Taborda y Mónica Ribeiro (2017). "A Modeling Approach to Assess the Key Factors in the Evolution of Coastal Systems: the Ebro North Hemidelta Case"; Estuaries and Coasts, nº 40, pp. 758-772.
- 5- Bayerri, Enrique (1934-35). "Historia de Tortosa y su comarca"; Imprenta Moderna del Alguerri-Tortosa.
- 6- Béjar, M., D. Vericat, I. Nogales, F. Gallart y Ramón J. Batalla Villanueva (2018). "Efectos de las extracciones de áridos sobre el transporte desedimentos en suspensión en ríos de montaña (alto río Cinca, Pirineo central)"; Cuadernos de investigación geográfica, Universidad de La Rioja, nº 42,2, pp. 641 a 658
- 7- Berga Casafont, Luís y Berga Martínez, Luis (2017). "Informe síntesis sobre la vulnerabilidad del delta del Ebro. Propuesta de medidas generales en el ámbito del Delta"; Comunitat de Regants del Canal de la Dreta.
- 8- Birkemeier, W.A. (1985). "Field data on seaward limit of profile change"; Journal Of Waterways, Port, Coastal And Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers (vol. 111, nº 3, pp. 598 a 602).
- 9- Bowen, A.J. y D.L. Inman. (1966). "Budget of littoral sands in the vicinity of Point Arguello, California"; U.S. Army Coastal Engineering Research Center (Memoria Técnica Nº 19).
- 10- Bruun, Per. (1962). "Sea level rise as a cause of shore erosion"; Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. American Society of Civil Engineers. Vol. 88. WW 1. (pp. 117 a 130).
- 11- Calvo Cubero, Juna y Gonzalo López Beltran (2010). "Bases para la restauración ecológica de la laguna costera de L'Alfacada (Delta del Ebro, España)"; Tesis de master en Gestión fluvial sostenible y gestión integrada de agua, Universidad de Zaragoza.
- 12- Callís, L., A. Sánchez-Arcilla, M. García, J.L. Monsó, F. Collado, E. Álvarez y A. Lo Presti (1988). "Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro: Estudio morfológico"; Informe técnico LT-2/4 para la Direcció General de Port i Costes, Generalitat de Catalunya, Barcelona.



- 13- Carreras i Candi, Francesch (1940). "La navegación en el río Ebro"; La hormiga de Or, Barcelona.
- 14- Catalán Lafuente, J.G. (1969). "Química del agua"; Editorial Blume (355 páginas).
- 15- CEDEX (1971). "Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza (Zaragoza). Septiembre-Octubre de 1970"; Centro de Estudios Hidrográficos (Informe Técnico para la Dirección General de Obras Hidráulicas).
- 16- CEDEX (1982). "Reconocimiento batimétrico del embalse de Mequinenza"; Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Informe técnico para la Dirección General Obras Hidráulicas).
- 17- CEDEX (2002) "El medio ambiente hídrico en el Delta del Ebro": Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Inédito).
- 18- CEDEX (2020). "Plan de actuación para la mejora del régimen sedimentario en el ámbito del delta del Ebro. Nota Técnica. Caracterización de los sedimentos existentes en los embalses de Mequinenza y Ribarroja y en el curso bajo del río Ebro (Tarea 2.1)". Madrid, abril de 2020 (Borrador) del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. **[CEH-CEDEX, 2020]**
- 19- CEDEX (2020). "Plan de actuación para la mejora del régimen sedimentario en el ámbito del delta del Ebro. Nota Técnica. Contenido y necesidades de información para la realización del estudio de dinámica fluvial (Avance de Tarea 2.4)". Madrid, abril de 2020 (Borrador) del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. **[CEH-CEDEX, 2020²]**
- 20- Centre Internacional D'Investigació dels Recursos Costaners - CIIRC. (2008). "Estat de la Zona Costanera a Catalunya. Volum I Aspectes metodològics"; Generalitat de Catalunya **[GENCAT, 2008]**.
- 21- Centre Internacional D'Investigació dels Recursos Costaners - CIIRC. (2010). "Llibre verd de l'Estat de la zona costanera a Catalunya. Tarragona"; Generalitat de Catalunya **[GENCAT, 2010]**.
- 22- Coastal Engineering Reseach Center (CERC) (1984). "Shore Protection Manual"; Department of The Army-U.S. Army Corps of Engineers.
- 23- Confederación Hidrográfica del Ebro (1996). "Diagnóstico y gestión ambiental de embalses en el ámbito de la cuenca hidrográfica del Ebro"; Informe técnico. Ministerio de Medio Ambiente. **[CHE, 1996]**
- 24- Confederación Hidrográfica del Ebro (2005). "Proyecto de regulación de la cota del embalse de Ribarroja para el control de la población del mejillón cebra"; Informe técnico. Ministerio de Medio Ambiente. **[CHE, 2005]**
- 25- Confederación Hidrográfica del Ebro (2010). "Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja"; Informe técnico **[CHE, 2010]**.



- 26- Confederación Hidrográfica del Ebro (2014). "Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro"; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. **[CHE, 2014]**
- 27- Confederación Hidrográfica del Ebro (2018). "Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix"; Informe técnico. **[CHE, 2018]**
- 28- Confederación Hidrográfica de Ebro (2020). "Plan de actuación para la mejora del régimen sedimentario en el ámbito del delta del Ebro. Informe. Evaluar la complejidad asociada al vaciado de los embalses (Tarea 2.3)". Madrid, abril de 2020 (Borrador). **[CHE, 2020]**
- 29- Conte, D. y P. Lionello (2013). "Characteristics of large positive and negative surges in the Mediterranean Sea and their attenuation in future climate scenarios"; Global and Planetary Change-Elsevier, vol. 111, pp. 159–173.
- 30- Control de obra Civil (2011). "Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza"; Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- 31- Control de obra Civil (2012). "Nivelación de precisión y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza"; Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- 32- C.U.R. (1987). "Manual on Artificial Beach Nourishment"; Center for Civil Engineering Research, Codes and Specifications (report 130).
- 33- Dangendorf, Sönke, Marta Marcos, Guy Wöppelmann, Clinton P. Conrad, Thomas Frederikse, y Riccardo Riva (2017). "Reassessment of 20th century global mean sea level rise". PNAS June 6, 2017. 114 (23) pp. 5946-5951.
- 34- Dean, R. G. (1977). "Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts"; Department of Civil Engineering, University of Delaware (Report nº 12).
- 35- Dean, R.G. (1987). "Additional sediment transport input to nearshore region"; Shore and Beach, Special Issue Dedicate to M.P. O'Brien (pp. 76 a 81).
- 36- Dean, R.G. y E.M. Maurmeyer (1983). "Model for beach profile response"; en "Handbook of Coastal Processes and Erosion". CRC Press (Capítulo 4, pp. 151 a 166).
- 37- Dean, R.G. (1991). "Beach response to Sea Level Rise", en "The Sea" editado por Le Mehauté y Hanes, Ocean Science Engineering (vol. 9, parte B).
- 38- Dean, Robert G y Todd L. Walton (2009). "Wave Setup" en "Handbook of Coastal and Ocean Engineering" editado por Young C. Kim; World Scientific (ISBN 978-981-281-929-1).
- 39- Deffontaines, Pierre (1949). "Le delta de l'Ebre, étude de géographie humaine", en La Catalogne vue par un géographe. Hommage a Pierre Deffontaines, pp. 1-17, Barcelona, 1960.



- 40- Departament de Medi Ambient i Habitatge (2008). “Estudios de base para una estrategia de prevención y adaptación al cambio climático en Cataluña. Número 1: el Delta del Ebro. Documento de síntesis”; Generalitat de Catalunya [**GENCAT 2008**]
- 41- Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar (2015). “Estudio ambiental estratégico para la evaluación ambiental de la estrategia de adaptación al cambio climático de la costa española”; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- 42- Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar (2016). “Estrategia de adaptación al cambio climático de la costa española”; Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- 43- ECOHYDROS (2008). “Aplicación de tecnologías acústicas en la detección y evaluación de poblaciones de peces y mejillón cebrá en los embalses de la cuenca del Ebro”; Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- 44- Fundación Agustín de Betancourt-UPM (2018). “Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix”; Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos-U. Politécnica de Madrid (Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro) (Profesor responsable D. Luis Garrote de Marcos).
- 45- Galofré, Jordi, Dolores Ortiz, José A. Jiménez y Raúl Medina (2012). “A management strategy for the Ebro delta in the context of flooding and climate change”; IV Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, PIANC (pp. 421 a 430).
- 46- Galofré, Jordi y José A. Jiménez (2016). “Coastal risks in the Ebro delta: influence of climate change”; 35 International Conference on Coastal Engineering (Presentación).
- 47- Gorriá, Hermenegildo (1877). “Desecación de las marismas y terrenos pantanosos denominados de Los Alfaques”; Ministerio de Agricultura.
- 48- Gorriá, Hermenegildo. (1880). “Navegación y riegos en la región inferior del Ebro”; Imprenta La Guirnalda. Madrid.
- 49- Grases, A., V. Gracia, M. García-León, J. Lin-Ye y J.P. Sierra (2020). “Coastal Flooding and Erosion under a Changing Climate: Implications at a Low-Lying Coast (Ebro Delta)”; Water, 12(2), 346.
- 50- Grassa Garrido, José María (1988). “Estudio sobre la regeneración de la playa del Trabucador”; Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (para la Dirección General de Costas del M.O.P.T.M.A.) [**CEDEX, 1988**].
- 51- Grupo Flumen (2009). “Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja”; Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.



- 52- Guillén, J. (1992). "Dinámica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del Delta del Ebro". Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- 53- Guillén J. y A. Palanques (1992). "Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro river"; *Sedimentology*, nº 39, pp. 567-579.
- 54- Guillén, J., J.L. Díaz y A. Palanques (1992). "Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo en el río Ebro al medio marino"; *Revista de la Sociedad Geológica Española* 5, 1-2 (pp.27-37).
- 55- Guillén, J. y A. Maldonado (1992). "Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro: Morfología y recubrimiento sedimentario de la plataforma continental interna y media en el delta del Ebro"; Informe técnico para la Direcció General de Port i Costes, Generalitat de Catalunya, Barcelona.
- 56- Hanson, H., S. Aarninkhof, M. Capobianco, J.A. Jiménez, M. Larson, R.J. Nicholls, N-G. Plant, H.N. Southgate, H.J. Steetzel, M.J.F. Stive y H.J. de Vriend (2003.). "Modelling of coastal evolution on yearly to decadal time scales"; *Journal of Coastal Research*, nº 19, vol. 4, pp. 790-811.
- 57- Hallermeier, R.J. (1981). "Seaward limit of significant sand transport by waves: an annual zonation for seasonal profiles"; U.S. Army, Corps of Engineers-Coastal Engineering Research Center (Coastal Engineering Technical Aid. Nº. 81-2).
- 58- Ibáñez C, A. Canicio, J.W. Day y A. Curcó (1997): "Morphologic development, relative sea level rise and sustainable management of water and sediment in the Ebre Delta, Spain"; *Journal of Coastal Conservation* 3, pp 191-202.
- 59- IBERINSA (1992) "Estudio de la regresión del Delta del Ebro y propuesta de alternativas de actuación"; Informe técnico para la Dirección General de Puertos y Costas.
- 60- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2006). "Guía para la gestión del combustible en las flotas de transporte por carretera"; Ministerios Industria, Turismo y Comercio; Fomento; e Interior. **[IDAE, 2006]**
- 61- Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, Universidad de Cantabria (2004). "Impactos en la costa española por efecto del cambio climático: Fase I. Evaluación de cambios en la dinámica costera española; Fase II. Evolución de efectos en la costa española; Fase III. Estrategias frente al cambio climático en la costa"; Informe técnico para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar. **[IH-UC, 2004]**
- 62- Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, Universidad de Cantabria (2009); "Previsión de los efectos del cambio climático en el Delta del Ebro y medidas de adaptación y prevención"; Informe técnico para Taller de Ingeniería Ambiental. **[IH-UC, 2009]**



- 63- Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, Universidad de Cantabria (2011). “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión de la desembocadura y cauce inferior del río en el delta del Ebro (Tarragona)”; Informe técnico para la DGSC y M. **[IHAC 2011]**
- 64- Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, Universidad de Cantabria y Laboratori d'Engnyeria Marítima (LIM) de la Universidad Politècnica de Catalunya (2012). “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero, desembocadura y cauce inferior del delta del Ebro”; Informe técnico para la DGSC y M. **[IHAC y LIM 2012]**
- 65- Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria, Universidad de Cantabria (2019). “Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos de cambio climático a lo largo de la costa española. Tarea 2: Proyecciones de alta resolución de variables marinas en la costa española”; Informe técnico para el Ministerio de Transición Ecológica. **[IH Cantabria-MITECO, 2019]**
- 66- IPCC (2014). “Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]”; IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs. **[IPCC, 2014]**
- 67- IPCC (2019). “Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. Weyer (eds.)]”. En edición. **[IPCC, 2019]**
- 68- Jefatura Regional de Costas y Puertos de Cataluña. (1978). “Plan Indicativo De Usos del Dominio Público Litoral. Tramo de Costa de la Provincia de Tarragona”; Dirección General de Puertos y Señales Marítimas, MOPU. **[MOPU, 1978]**
- 69- Jiménez, J.A., M.A. García y A. Sánchez-Arcilla (1990). “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el Delta del Ebro. Estimación del transporte de sedimentos en el río Ebro. Contribución a la evolución costera”; Direcció General de Port i Costes, Generalitat de Catalunya, Informe técnico LT-2/7. **[GENCAT, 1990^a]**
- 70- Jiménez, J.A., M.A. García y A. Sánchez-Arcilla (1990). “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el Delta del Ebro. Balance sedimentario”; Direcció General de Port i Costes, Generalitat de Catalunya, Informe técnico LT-2/8. **[GENCAT, 1990^b]**
- 71- Jiménez, J.A. y M.A. García, M.A. (1991). “Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el delta del Ebro: Balance sedimentario a partir de las tendencias evolutivas de la línea de orilla”; Direcció General de Port i Costes, Generalitat de Catalunya, Informe técnico LT-3/3. **[GENCAT, 1991]**
- 72- Jiménez, J.A., A. Sánchez-Arcilla, M.A. García y H.S. Jan van Overeem (1991). “Erosión de la Barra del Trabucador durante la tormenta de octubre de 1990”; Revista de Obras Públicas (febrero de 1991, pp. 23 a 30).



- 73- Jiménez, J.A., V. Gracia, M.A. García y A. Sánchez-Arcilla (1992). "Análisis y propuesta de soluciones para estabilizar el Delta del Ebro: Balance sedimentario y esquemas de transporte"; Direcció General de Port i Costes, Generalitat de Catalunya, Informe técnico LT-3/4.
- 74- Jiménez, J.A. y A. Sánchez-Arcilla (1993). "Medium-term coastal response at the Ebro delta, Spain"; Marine Geology, nº 114, pp. 105-118.
- 75- Jiménez Quintana, José Antonio (1996). "Evolución costera en el delta del Ebro: un proceso a diferentes escalas de tiempo y espacio"; Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- 76- Jiménez, J.A. y A. Sánchez-Arcilla (1997). "A Conceptual Model for Barrier Coasts Behaviour at Decadal Scale. Application to the Trabucador Bar"; Proceedings of Coastal Dynamics'97, ASCE Press (pp. 913-922).
- 77- Jiménez, J.A., A. Sánchez-Arcilla, H.I. Valdemoro, V. Gracia, y F. Nieto (1997). "Processes reshaping the Ebro delta"; Marine Geology, nº 144, pp. 59-79.
- 78- Jiménez, J.A., A. Sánchez-Arcilla, A. Maldonado (1997). "Long to short term coastal changes and sediment transport in the Ebro delta; a multi-scale approach"; Bulletin de l'Institut oceanographique, Monaco, nº special 18, pp. 169-185.
- 79- Jiménez J.A., A. Sánchez-Arcilla y H.I. Valdemoro (2005). "Effects of storm impacts in the Ebro delta coast"; Floodsite Report T26-05-10.
- 80- Jiménez, J.A., H.I. Valdemoro, E. Bosom y V. Gracia (2011). "Storm-induced coastal hazards in the Ebro delta (NW Mediterranean)"; Coastal Sediments 2011, World Scientific, pp. 1332-1345.
- 81- Jones, Chris (director) (2005). "Wave Runup and Overtopping"; FEMA Coastal Flood Hazard Analysis and Mapping Guidelines Focused Study Report.
- 82- Komar, P.D. (1996). "The Budget of Littoral Sediments Concepts and Applications"; Shore & Beach (vol. 64, nº 3, pp. 18 a 26).
- 83- Kriebel, D.L. y R.G. Dean (1993). "Convolution method for time-dependant beach-profile response"; Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. American Society of Civil Engineers. Vol. 119, nº2 (pp. 204 a 226).
- 84- Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM) de la Universidad Politécnica de Cataluña (1992). "Anteproyecto de soluciones tipo alimentación artificial"; Direcció General de Port i Costes, Generalitat de Catalunya. **[LIM, 1992¹]**
- 85- Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM) de la Universidad Politécnica de Cataluña (1992). "Anteproyecto de soluciones tipo mixto"; Direcció General de Port i Costes, Generalitat de Catalunya. **[LIM, 1992²]**
- 86- Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM) de la Universidad Politécnica de Cataluña y Universidad de Barcelona (1999-2000). "Caracterización de la problemática y



- alternativas de gestión y actuación para las costas del Delta del Ebro”; Informe técnico para la Dirección General de Costas. **[LIM-UB, 2000]**
- 87- Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM) de la Universidad Politècnica de Catalunya (2011). “Estudio y análisis de alternativas de actuación y gestión del frente costero del Delta del Ebro”; Informe técnico para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar. **[LIM, 2011]**
- 88- Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM) de la Universidad Politècnica de Catalunya (2018). “Análisis de la ‘Propuesta de medidas generales en el ámbito del Delta’ incluida en el ‘Informe-síntesis sobre vulnerabilidad del delta del Ebro’”; Informe técnico para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar. **[LIM, 2018]**
- 89- Laboratorio de Puertos "Ramón Iribarren" (1979). "Dinámica litoral de las costas mediterránea y onubense. Provincias de Tarragona, Castellón y Valencia"; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, M.O.P.U.
- 90- Lechuga, A., López, J.A. (1997). “Evolución reciente del Delta del Ebro. Aportes de sedimentos por el río. El oleaje y el transporte sólido litoral”; Revista de Ingeniería Civil, 164, pp. 99-107. CEDEX.
- 91- López, José Santos (1995). Estudio de la dinámica litoral del delta del Ebro y pronóstico de su evolución. Recopilación y análisis de los trabajos sobre el Delta del Ebro”; Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (para la Dirección General de Costas del M.O.P.T.M.A., clave 22-494-5-035) **[CEDEX, 1995]**.
- 92- Maldonado, A. (1972). “El delta del Ebro. Estudio sedimentológico y estratigráfico. Boletín de Estratigrafía, 1, Universidad de Barcelona, 450 paginas.
- 93- Martin, K., (1993). “Applications in Coastal Zone Research and Management”; Explorations in Geographical Information Systems Technology. Volumen 3. United Nations Institute for Training and Research (Instituto de las Naciones Unidas para Formación Profesional e Investigaciones-UNITAR). Suiza.
- 94- Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO) (2008). “Directrices sobre actuaciones en playas”; www.miteco.gob.es/es/costas/publicaciones/
- 95- Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO) (2013). “Elaboración de los Mapas de Peligrosidad y Riesgos requeridos por el Real Decreto 903/2010 en la Costa Española”; www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/mapa-peligrosidad-riesgo-inundacion/
- 96- Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITECO) (2019); “Elaboración de la metodología y bases de datos para la proyección de impactos del cambio climático a lo largo de la costa Española”; <https://www.adaptecca.es/recursos/buscador/proyeccion-de-impactos-de-cambio-climatico-en-la-costa-espanola>.



- 97-Moliner Coll, Victor (2006). "Recuperación del Delta del Ebro I. Recuperación de la configuración del Delta del Ebro"; Tesina, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona.
- 98-Montoya, F. J. y J. Galofré (1997). "La particularidad sobre la actuación física en la costa: Caso del Delta del Ebro"; Revista de Obras Públicas (nº 3.368, septiembre 1997, pp. 33 a 43).
- 99-Muñoz, I. (1990). "Limnología de la part baixa del riu Ebre i els canals de reg: els factors físico-químics, el fitoplancton i els macroinvertebrats bentònics". Tesis Doctoral. Universitat de Barcelona.
- 100-National Institute of Coastal and Marine Management of the Netherlands (2004). "A guide to coastal erosion management practices in Europe"; Directorate General Environment, European Commission **[EUROSION, 2004]**.
- 101-Nelson, C.Hans. (1990). "Estimated post-Messinian sediment supply and sedimentation rates on the Ebro continental margin, Spain"; Marine Geology, vol. 95, pp. 395-418.
- 102-Oficina Catalana del Canvi Climatic (2011). "Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)"; GENCAT, Comisión Interdepartamental del Cambio Climático. **[OCCC, 2011]**.
- 103-Oficina Catalana del Canvi Climatic (2017). "Accions per al clima al Delta de l'Ebre (ACDE)-Diagnosi"; GENCAT (LIFE13 ENV/ES/001182) **[OCCC, 2017]**.
- 104-Oficina Española de Cambio Climático –OECC- (2005). "Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático"; Ministerio de Medio Ambiente. **[OECC, 2005]**
- 105-Palanqués, A. (1987). "Dinámica sedimentaria, mineralogía, microcontaminantes inorgánicos de las suspensiones de los sedimentos superficiales en el margen continental del Ebro"; Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña (450 páginas).
- 106-Peña Olivas, José Manuel (1996). "Estudio de la dinámica litoral del delta del Ebro y prognosis de su evolución (dinámica litoral del delta del Ebro) - informe final"; Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (para la Dirección General de Costas del M.O.P.T.M.A., clave 22-494-5-035) **[CEDEX, 1996]**.
- 107-Peña Olivas, José Manuel de la (2011-2016). "inventario de puertos antiguos en Hispania"; Accésit premio internacional García Diego, fundación Juanelo Turriano en 2012 y publicado en 2016 por el CEDEX-Ministerio de Fomento.
- 108-Peña Olivas, José Manuel de la y Ana I. Antón Camacho (2012). "3.3.4: Estudio de profundidad de cierre en las costas españolas partiendo de datos reales de seguimiento. Aplicación a criterios para regeneración de playas mediante alimentación artificial"; Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (nº 22-410-5-001, informe técnico para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar). **[CEDEX 2012]**.



- 109-Peña Olivas, José Manuel de la (2019). "Lección 4: Vientos, corrientes y nivel del mar" en "Curso de ingeniería de costas, y medio ambiente marino y costero"; CEDEX (en edición).
- 110-Plan Hidrológico Nacional (2000) **[PHN, 2000]**; BOE núm. 161, de 6 de julio de 2001, pp. 24228 a 24250.
- 111-Rey, Jorge J. y Teresa Medialdea (1989). "Los sedimentos cuaternarios superficiales del margen continental español"; Instituto Español de Oceanografía, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- 112-Rovira A., C. Ibáñez y J.P. Martín-Vide (2015). "Suspended sediment load at the lowermost Ebro River (Catalonia, Spain)"; Quaternary International, nº 388, pp. 188-198.
- 113-Samper Garcia, Yaiza (2019): "Análisis experimental de la hidrodinámica y calidad de las aguas en la Bahía del Fangar"; Trabajo fin de master de la Escuela Técnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- 114-Sánchez Palomar, Francisco J. y José M. de la Peña Olivas (2009). "Estudio de perfiles de playa y su adaptación a las costas españolas"; Centro de Estudios De Puertos Y Costas del CEDEX (Nº 22-408-5-002, Informe Técnico para la Dirección General De Sostenibilidad de la Costa y del Mar). **[CEDEX, 2009]**
- 115-Sanz Montero, M.E., C. Avendaño Salas, y R. Cobo Rayán (2001). "Influencia del complejo de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix (río Ebro) en la morfología del cauce situado aguas abajo"; Revista de la Sociedad Geológica de España, 14(1-2), pp. 3-17.
- 116-Sánchez-Arcilla, A., M.J.F. Stive, J.A. Jiménez y M.A. García (1993). "Impact of sea-level rise in a Mediterranean delta: The Ebro Delta case"; Seachange'93, UNESCO: IV, pp. 53-62.
- 117-Sánchez-Arcilla, A. y J.A. Jiménez (1994). "Breaching in a wave-Dominated Barrier Spit: The Trabucador Bar (NE Spanish Coast)"; Earth Surface Processes and Landforms, nº 19 (pp. 483 -498).
- 118-Sánchez-Arcilla, A., J.A. Jiménez, V. Gracia, H.I. Valdemoro y F. Nieto (1996). "Physical impacts of climatic change on the Ebro delta coast. Impact of Climatic Change on Nonhwestern Meditenanean Deltas"; Vol. II, Final Workshop, Venice, 4.7-4.28.
- 119-Sánchez-Arcilla, A., J.J. Jiménez, G. Gelonch y J. Nieto Romeral (1997). "El problema erosivo en el Delta del Ebro"; Revista de Obras Públicas (nº 3.368, septiembre 1997, pp. 23 a 32).
- 120-Sánchez-Arcilla, A., J.A. Jiménez y H.I. Valdemoro (1998). "The Ebro delta: morphodynamics and vulnerability"; Journal of Coastal Research (nº 14, pp. 754-772.).



- 121-Sánchez Rojas, Virginia (2008). “Propuesta de embalse piloto para el aprovechamiento de sus sedimentos”; Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (para la Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar) **[CEDEX, 2008]**.
- 122-Sayol, J. M. y M. Marcos (2019); “Assessing Flood Risk Under Sea Level Rise and Extreme Sea Levels Scenarios: Application to the Ebro Delta (Spain)”. *Journal Geophysical Research: Ocean* 123(2), 794-811.
- 123-Serra, J., Colombo, F., Canals, M. y Guillén, J. (1990). “Comportamiento hidráulico y sedimentario del río Ebro, entre Tortosa y Amposta (Tarragona, España)”; *Geogaceta*, 8, pp.107-109.
- 124-Serra Raventós, Jordi (1997). “El sistema sedimentario del Delta del Ebro”; *Revista de Obras Públicas* nº 3368, pp. 15-22.
- 125-Stockdon, H.F., R.A. Holman, P.A. Howd y A.H. Sallenger (2006). “Empirical parameterization of setup, swash, and runup”; *Coastal Engineering*, nº 53, pp. 573–588.
- 126-Taller de Ingeniería Ambiental, S.L. (2007). “Estrategia para la gestión sostenible de la costa. Demarcación hidrográfica del Ebro: Documento de diagnóstico preliminar”; Informe técnico para la Dirección General de Costas.
- 127-Tena A, R.J. Batalla y D Vericat (2012). “Reach-scale suspended sediment balance downstream from dams in a large Mediterranean river”; *Hydrological Sciences Journal* 57, pp. 1–19.
- 128-Tena, A. y R.J. Batalla (2013). “The sediment budget of a large river regulated by dams (The lower River Ebro, NE Spain)”; *Journal of Soils and Sediments* 13, pp. 966–980.
- 129-TRAGSATEC (2012). “Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008”; Informe Técnico para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- 130-Varela, J.M., A. Gallardo y A. López de Velasco (1986). “Retención de sólidos por los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Efecto sobre los aportes al delta del Ebro” en: M. Mariño (ed.), “El sistema integral del Ebro: cuenca, delta y ambiente marino”; *Graficas Hermes*, Madrid (pp. 203 a 219).