



Predicción hidrológica estacional en España

Descripción técnica

Mayo de 2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Instituto de Ingeniería del
Agua y Medio Ambiente



ÍNDICE

1	Introducción	1
2	Metodología.....	3
3	Resultados sistema predicción cuencas intercomunitarias	15
4	Conclusiones	21
5	Referencias.....	23



Índice detallado

1	Introducción	1
2	Metodología.....	3
2.1	Modelo de simulación hidrológica. Patrical	4
2.2	Predicciones basadas en la lluvias y temperaturas históricas.....	7
2.3	Predicciones basadas en el modelo de clima ECMWF.....	10
2.4	Predicción conjunta histórica y modelo	13
3	Resultados sistema predicción cuencas intercomunitarias	15
4	Conclusiones	21
5	Referencias.....	23



Índice de figuras

Figura 1. Metodología de la predicción hidrológica estacional de España (adaptado de WMO, 2021).	3
Figura 2. Precipitación, temperatura y aportación en la red fluvial en octubre de 2000 y esquema de funcionamiento del modelo Patrical (Pérez-Martín et al., 2014).	4
Figura 3. Caudales mensuales en régimen natural al embalse del Tranco de Beas en el río Guadalquivir (m ³ /s), y niveles piezométricos en la masa de agua subterráneas de Rus-Valdelobos (m.s.n.m.). Contraste entre el modelo y los datos históricos.	5
Figura 4. Ajuste entre los resultados del modelo y los caudales observados o restituidos a régimen natural, criterios de Moriasi et al. (2007).	5
Figura 5. Modelo de simulación de nitrato Patrical (Perez-Martin et al., 2016)...	6
Figura 6. Datos históricos de precipitación (izquierda) y temperatura de España (derecha), valores medios y bandas de confianza del 25-75% y del 10-90%.	7
Figura 7. Predicciones hidrológicas a final de año hidrológico basadas en las lluvias y temperaturas históricas, predicciones individuales (members, izquierda) y predicción media y banda de confianza de la predicción (ensemble, derecha), resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023.	8
Figura 8. Clasificación del año hidrológico de las aportaciones del río Duero en Zamora entre húmedo, normal o seco, resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023.	9
Figura 9. Clasificación del año hidrológico de las aportaciones de los ríos Ter y Llobregat, resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023.	9
Figura 10. Anomalía en predicción media meteorológica estacional modelo ECMWF-System 5.1, precipitación mensual (arriba) y temperatura mensual (abajo).	10
Figura 11. Precipitación observada (negro) y predicción media meteorológica estacional (rojo) modelo ECMWF-System 5, precipitación mensual (izquierda) y precipitación acumulada (derecha), resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023.	11
Figura 12. Temperatura mensual observada (negro) y predicción media meteorológica estacional (rojo) modelo ECMWF-System 5, resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023.	11
Figura 13. Predicción hidrológica estacional del río Duero en Zamora basada en la predicción climática del modelo ECMWF System-5, resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023. Predicción individual	



(members, izquierda) mensual (arriba) y acumulada (abajo) y conjunto de la predicción con la media y la banda de confianza (derecha) mensual (arriba) y acumulada (abajo) 12

Figura 14. Combinación de la predicción hidrológica estacional basada en los datos históricos y en el modelo de clima ECMWF, resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023..... 13

Figura 15. Red de 80 puntos de predicción hidrológica estacional en las cuencas intercomunitarias..... 15

Figura 16. Aportaciones mensuales calculadas y predicción hasta final del año hidrológico, predicciones calculadas en abril de 2023. 18

Figura 17. Aportaciones mensuales acumuladas calculadas y predicción hasta final del año hidrológico, predicciones calculadas en abril de 2023. 19

Figura 18. Probabilidad de ocurrencia de los terciles húmedo, medio y seco, predicciones calculadas en abril de 2023..... 20

Figura 19. Resultados numéricos año hidrológico..... 20



1 Introducción

La predicción hidrológica estacional está teniendo un importante desarrollo en el mundo gracias a las mejoras en la predicción meteorológica estacional (WMO, 2021). El desarrollo de metodologías y herramientas de predicción hidrológica estacional facilita la disponibilidad de nuevas fuentes de información para los gestores de agua de las Demarcaciones Hidrográficas, de forma que mejora la certidumbre en la toma de decisiones sobre la gestión del agua anual en los sistemas de recursos hídricos, facilitando así la planificación de la campaña hidrológica a los usuarios finales (usuarios de agua agrícola, urbana y otros).

La predicción meteorológica estacional consiste en la predicción mensual de lluvias y temperaturas a medido plazo, considerando habitualmente un periodo de 6 meses. Esta predicción está siendo elaborada en la actualidad por múltiples centros meteorológicos siendo en Europa un referente la realizada por el centro europeo de predicción climática a medio plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) con el modelo climático ECMWF- System 5. A partir de estas predicciones climáticas se realizan predicciones hidrológicas estacionales en diferentes países, como Reino Unido, Estados Unidos o Australia.

La predicción hidrológica estacional para toda España está formada por la combinación de dos tipos de predicción: la predicción de aportaciones hasta final del año hidrológico basada en los datos de lluvia y temperatura de los últimos años y la predicción hidrológica estacional basada en los mapas de lluvia y temperatura de la predicción meteorológica estacional a 6 meses obtenida del modelo del centro europeo de predicción climática a medio plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ECMWF- System 5.

Los mapas de lluvia y temperatura son el dato de entrada de un modelo hidrológico previamente calibrado y validado para toda España, el modelo Patricial (Pérez-Martín et al., 2014), con el que se obtienen las aportaciones futuras para cada una de las posibles realizaciones de lluvia y temperatura de la predicción.

En el contexto de Cambio Climático, está demostrado que en España se producirá a lo largo de este siglo una reducción paulatina de los recursos hídricos naturales (Estrela et al., 2012) y que las sequías serán cada vez más frecuentes y de mayor intensidad (CEDEX, 2017; Pérez-Martín et al., 2015). Es por ello que herramientas que faciliten el conocimiento sistemático de la evolución hidrológica para la identificación temprana de sequías y su gestión son elementos fundamentales para la adaptación de las cuencas hidrográficas y los sistemas de recursos hídricos al cambio climático. Además, permite mejorar la planificación anual de la gestión del agua por parte de los gestores y a su vez la planificación de la campaña por parte de los usuarios finales, pudiendo influir en las decisiones finales acerca de la planificación del cultivo o del origen del agua a utilizar.



2 Metodología

La predicción hidrológica estacional está compuesta por dos elementos fundamentales: la determinación de las condiciones iniciales de la cuenca hidrográfica y la variabilidad climática futura (WMO, 2021). La metodología propuesta para la predicción hidrológica estacional de España (Figura 1) consiste en la combinación de dos tipos de predicción: la predicción de aportaciones hasta final del año hidrológico basada en los datos de lluvia y temperatura de los últimos años y la predicción hidrológica estacional basada en los mapas de lluvia y temperatura de la predicción meteorológica estacional a 6 meses obtenida del modelo ECMWF- System 5, junto con la determinación de las condiciones de partida (condiciones iniciales) mediante simulación con el modelo hidrológico igual para ambos casos.

Las condiciones iniciales de la cuenca hidrográfica representan el estado de reservas de agua en los acuíferos, en el suelo o en forma de reserva de nieve en la situación de partida de las simulaciones. En la metodología propuesta se obtienen mediante simulación hidrológica a partir de los datos de precipitación y temperatura observados en la red de estaciones meteorológicas de Aemet de los últimos meses.

La predicción hidrológica estacional se obtiene con un modelo hidrológico previamente calibrado, el modelo Patricial, el cual se aplica repetidamente para cada combinación de lluvias y temperaturas futuros.

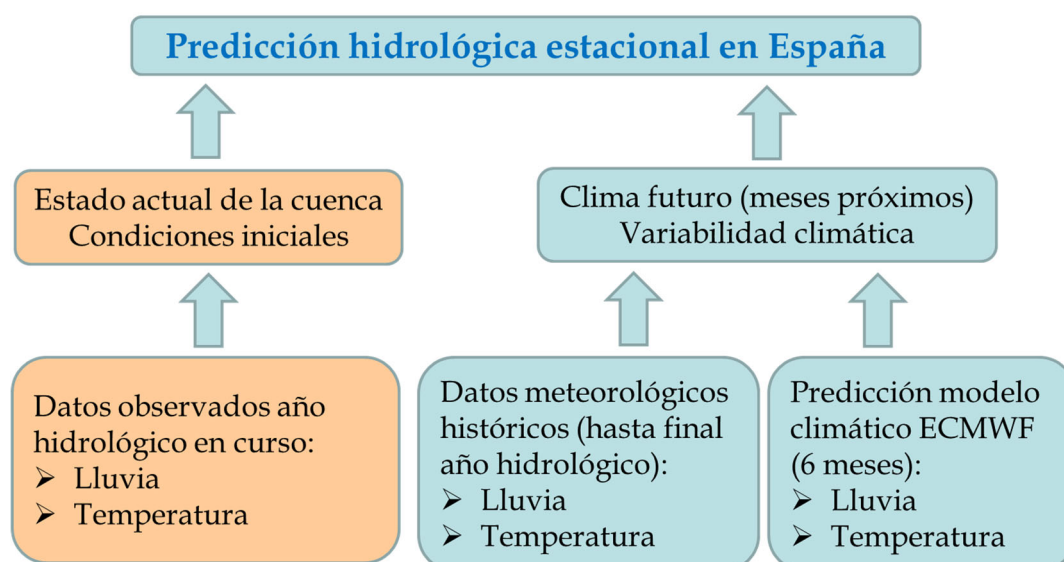


Figura 1. Metodología de la predicción hidrológica estacional de España (adaptado de WMO, 2021).



2.1 Modelo de simulación hidrológica. Patrical

El modelo "PATRICAL", es una herramienta que realiza el balance mensual de agua (Pérez-Martín et al., 2014) y el transporte de sustancias químicas (Pérez-Martín et al., 2016) para grandes cuencas hidrográficas. Este modelo se utiliza para la determinación de las concentraciones de nitrato en aguas superficiales y subterráneas y la evaluación de la eficacia de las medidas para la recuperación de ríos y acuíferos en toda España; el análisis del efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico; la realización de predicciones hidrológicas estacionales; la elaboración de índices de sequía; el análisis de la concentración de fósforo en ríos; la evaluación del transporte de sedimentos en ríos; la determinación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos; y otros resultados.

El software "PATRICAL" permite construir modelos distribuidos de simulación del ciclo hidrológico y calidad de las aguas para cuencas hidrográficas de tamaño mediano y grande (de 1.000 km² a 500.000 km²), con un paso de tiempo mensual e integrado en un sistema de información geográfica (SIG). El modelo incluye la obtención de las aportaciones superficiales y la variación del volumen almacenado en los acuíferos (Figura 2). Los modelos hidrológicos construidos con esta herramienta son utilizados por las administraciones encargadas de la Planificación y Gestión de los recursos hídricos en España y en proyectos de investigación. Actualmente, se aplica en la cuenca hidrográfica de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (43.000 km²), considerando más de 300 acuíferos, y en el conjunto de todo el país (500.000 km²) incluyendo la simulación con más de 1500 acuíferos.

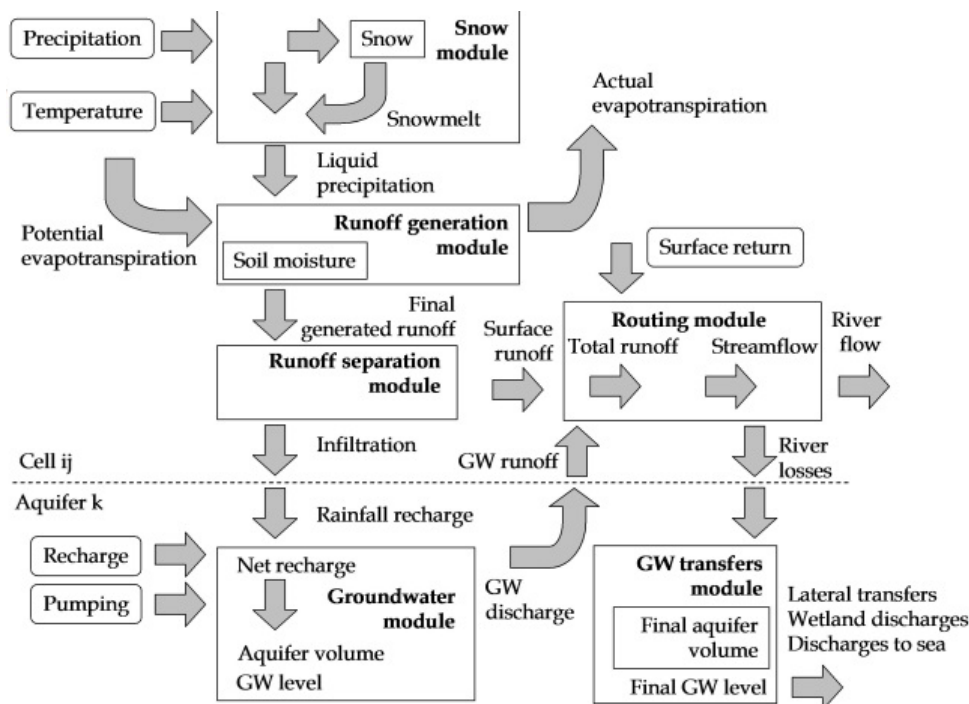


Figura 2. Precipitación, temperatura y aportación en la red fluvial en octubre de 2000 y esquema de funcionamiento del modelo Patrical (Pérez-Martín et al., 2014).



Los resultados de caudales circulantes del modelo se contrastan con las series aforadas, entradas a embalses o con las series restituidas a régimen natural (Figura 3 izquierda), por otra parte, los resultados de niveles piezométricos medios en el acuífero se contrastan con los niveles observados en los puntos de control del acuífero (Figura 3 derecha).

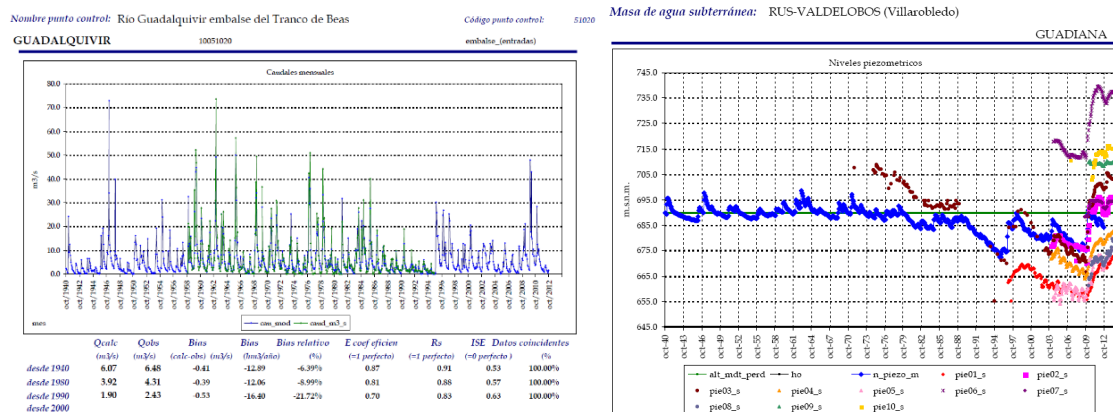


Figura 3. Caudales mensuales en régimen natural al embalse del Tranco de Beas en el río Guadalquivir (m³/s), y niveles piezométricos en la masa de agua subterráneas de Rus-Valdelobos (m.s.n.m.). Contraste entre el modelo y los datos históricos.

El conjunto de resultados del modelo se contrasta con los caudales observados y se evalúa la bondad de este ajuste (Figura 4) con los criterios establecidos por Moriasi et al. (2007), basados en la desviación media del modelo, bias relativo, y en el coeficiente de Nash (Nash, 1970).

Puntos de control:

Aforos, entradas embalses
y series restituidas

- Ajuste
- Muy bueno
 - Bueno
 - Satisfactorio
 - Próximo a Satisfactorio
 - Distante a Satisfactorio
 - Mal ajuste

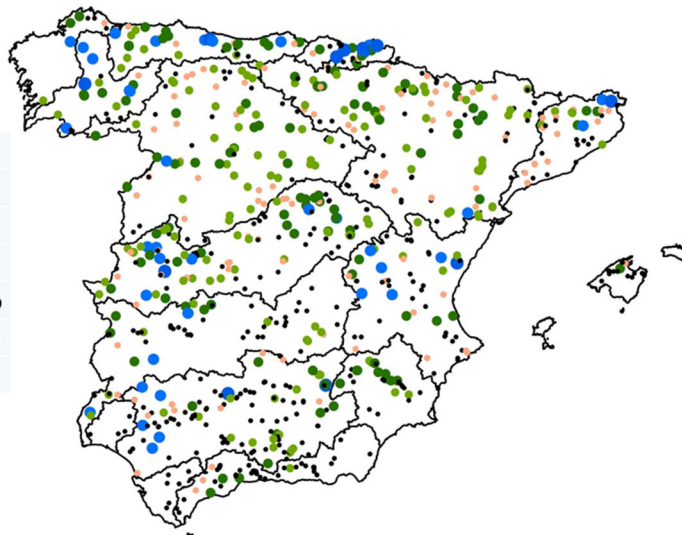


Figura 4. Ajuste entre los resultados del modelo y los caudales observados o restituidos a régimen natural, criterios de Moriasi et al. (2007).

La simulación de la calidad del agua, en aguas superficiales y aguas subterráneas, incluye: el transporte de nitrógeno, en su forma movilizable "nitrito"; la generación de erosión y el transporte de sólidos; el transporte de fósforo, y la conductividad eléctrica del agua a 25 °C. La simulación del transporte de sustancias químicas incluye tres depósitos en cada punto de la cuenca hidrográfica (Figura 5): la zona superficial del suelo, donde existe agua en forma



de humedad del suelo y las sustancias químicas que ser arrastradas por la escorrentía superficial o por la infiltración al acuífero; el medio no saturado y el acuífero. En el acuífero se considera que se produce el mezclado total de las sustancias químicas en el agua.

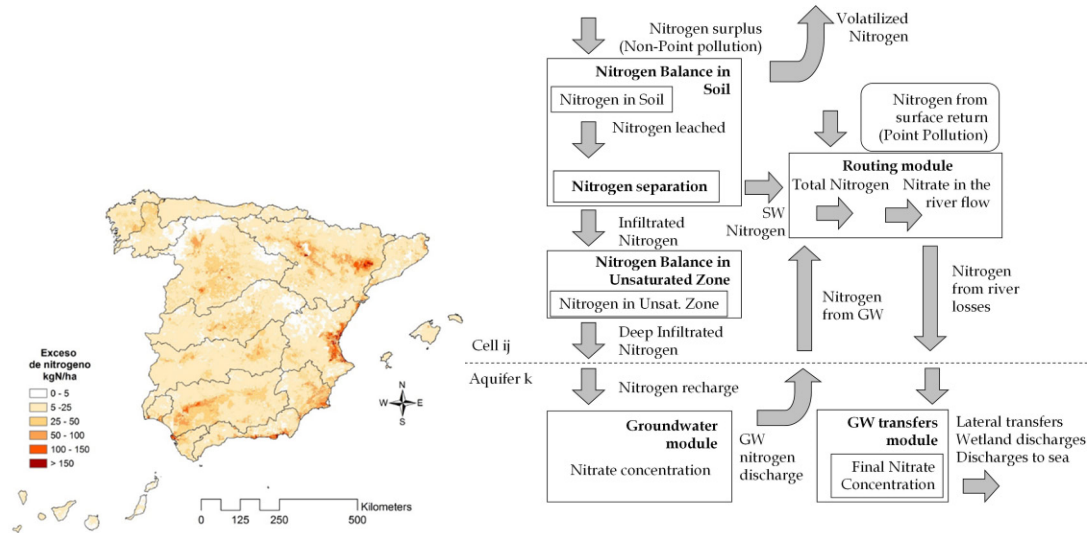


Figura 5. Modelo de simulación de nitrato Patricial (Perez-Martin et al., 2016).



2.2 Predicciones basadas en la lluvias y temperaturas históricas

Las predicciones hidrológicas estacionales basadas en las lluvias y temperaturas históricas consisten en simular el ciclo hidrológico hasta final del año hidrológico, con el modelo de simulación hidrológica Patrical, partiendo de las condiciones hidrológicas actuales de la cuenca y utilizando la información de lluvias y temperaturas históricas de los últimos años (Figura 6). Las lluvias históricas se extraen del conjunto de registros históricos (Figura 6 izquierda), donde la línea azul oscura representa la precipitación media mensual, el área azul representa el rango de precipitaciones históricas mensuales entre el percentil del 25% y el percentil del 75% (banda de confianza del 25-75%) y, finalmente, el área azul clara representa el rango de precipitaciones más bajas y más elevadas asociadas al percentil 10% (menor lluvia cada 10 años) y al percentil 90% (lluvia más elevada cada 10 años), banda de confianza del 10-90%.

Las temperaturas también se extraen del conjunto de registros históricos de los últimos años (Figura 6 derecha), donde la línea naranja representa la temperatura media y las áreas representan, de igual forma, el rango de percentiles del 25% al 75% y del 10% al 90%.

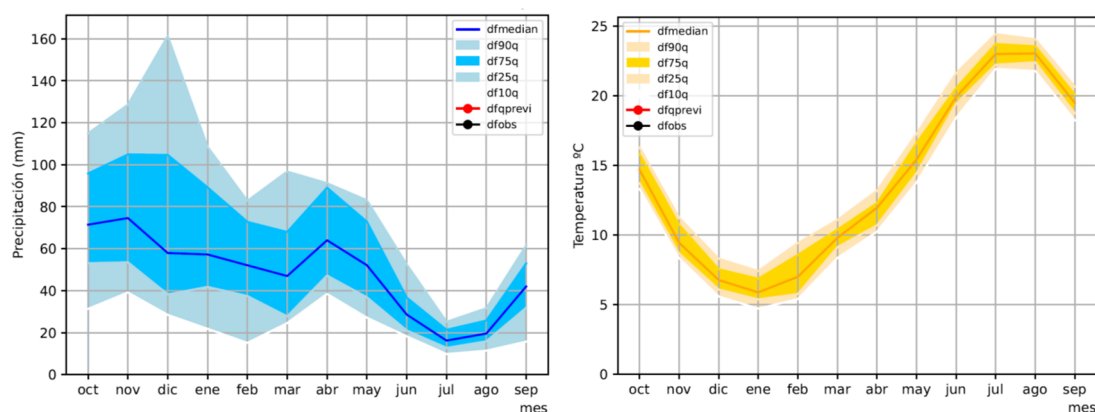


Figura 6. Datos históricos de precipitación (izquierda) y temperatura de España (derecha), valores medios y bandas de confianza del 25-75% y del 10-90%.

A partir de los datos históricos de precipitación y temperatura se extraen las series de cada año de precipitación y temperatura, de forma que se simula desde el mes de inicio de la predicción hasta el final del año hidrológico, uno por uno, con los datos históricos de lluvia y temperatura, es decir la lluvia y temperatura del año hidrológico 1985/86, del año 1986/87, del año 1987/88, y así sucesivamente hasta la actualidad. Cada año histórico utilizado en la simulación corresponde con una realización (member, línea gris), de forma que se tienen aproximadamente 35 realizaciones, las cuales configuran el conjunto de simulaciones (ensemble), de los cuales es posible extraer la predicción media y los percentiles de la predicción.

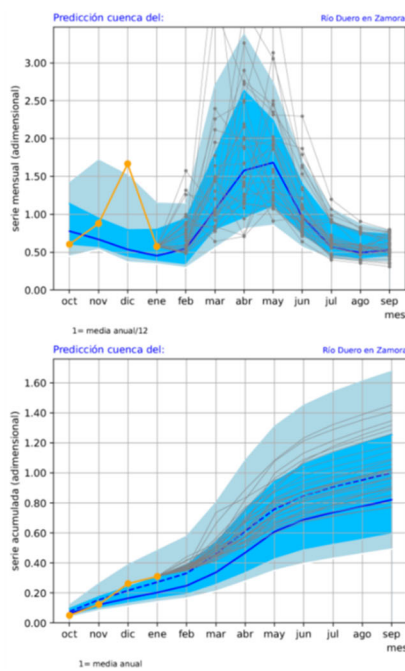
En las predicciones hidrológicas estacionales basadas en los datos históricos de precipitación y temperatura (Figura 7), en primer lugar el modelo simula los



caudales de los últimos meses a partir de los datos observados de precipitación y temperatura (línea naranja), lo que determina el punto de inicio de la predicción. A partir de ese momento se simulan las aportaciones futuras para cada una de las realizaciones (línea gris parte izquierda), obteniéndose tanto las aportaciones mensuales (superior izquierda) como las aportaciones mensuales acumuladas desde el inicio del año hidrológico (inferior derecha). Los resultados de predicción hidrológica estacional se contrastan con los registros históricos de aportaciones, correspondientes con la línea azul y las áreas azules, de forma que es posible determinar si la predicción se asemeja a la media, se encuentra dentro de la banda de confianza del 20-75%, lo que sería un año hidrológico normal, o se sitúa en la banda azul claro o fuera de esta banda, lo que daría un año hidrológico húmedo (zona superior) o seco (zona inferior).

A partir de las predicciones individuales (Figura 7 izquierda) puede determinarse la predicción media y la certidumbre de la predicción (Figura 7 derecha), con la predicción media (línea verde) y la banda de confianza de la predicción de 25-75% (línea verde discontinua).

35 Realizaciones (members)



Conjunto (ensemble), media y banda confianza

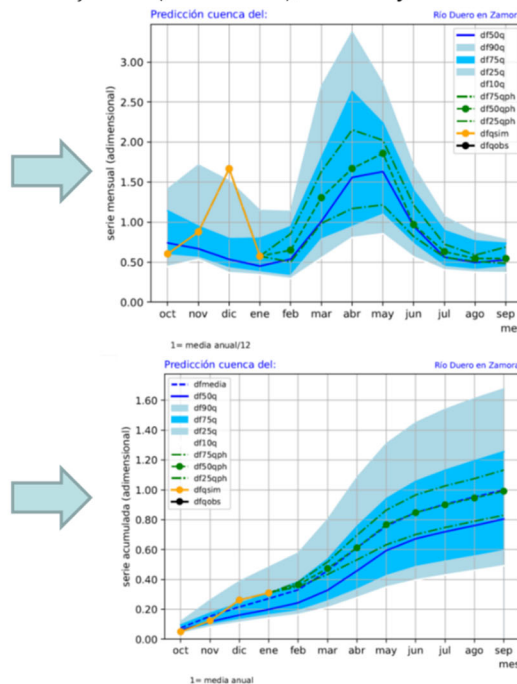


Figura 7. Predicciones hidrológicas a final de año hidrológico basadas en las lluvias y temperaturas históricas, predicciones individuales (members, izquierda) y predicción media y banda de confianza de la predicción (ensemble, derecha), resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023.

En el ejemplo de predicción de aportaciones en el río Duero en Zamora se observa que la predicción media de aportaciones se superpone a la aportación media histórica del río Duero en ese punto (línea azul continua). Por otro lado, analizando como se clasificaría el año hidrológico al término del mismo (mes de septiembre en la Figura 8), a final de año hidrológico hay un 46% de posibilidades de que el año sea húmedo, un 53% de posibilidades de que el año acabe siendo



normal y únicamente menos de un 1% de posibilidades de que el año acabe siendo seco.

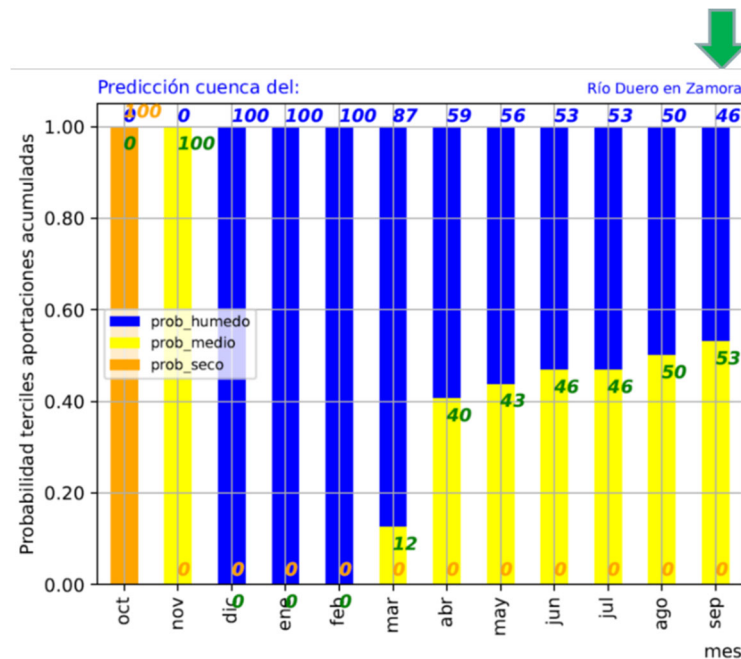


Figura 8. Clasificación del año hidrológico de las aportaciones del río Duero en Zamora entre húmedo, normal o seco, resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023.

Este tipo de gráficos permite identificar fácilmente, las cuencas hidrográficas que podrían tener unas aportaciones reducidas a final del año hidrológico, como el caso de las cuencas del Ter y del Llobregat (Figura 9) que con la predicción realizada a inicios de febrero de 2023 tienen una alta probabilidad 59% y 43% de que el año acabe siendo seco.

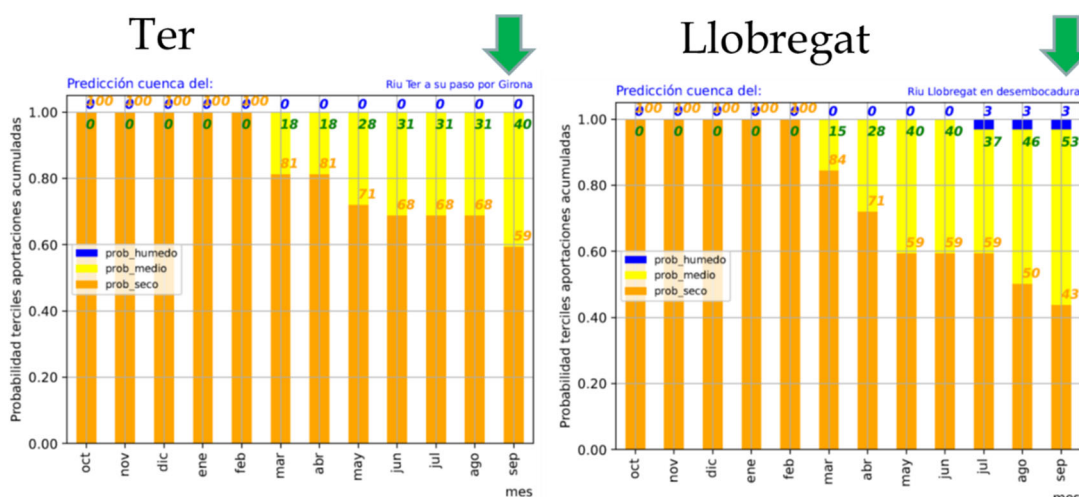


Figura 9. Clasificación del año hidrológico de las aportaciones de los ríos Ter y Llobregat, resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023.



2.3 Predicciones basadas en el modelo de clima ECMWF

Las predicciones hidrológicas estacionales basadas en las lluvias y temperaturas del modelo de simulación del clima ECMWF consisten en simular el ciclo hidrológico de los siguientes 6 meses, con el modelo de simulación hidrológica Patricial, utilizando los mapas de precipitación y temperatura del Centro Europeo de predicción del clima a medio plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) obtenidas con el modelo ECMWF-System 5. El modelo hidrológico parte de las condiciones hidrológicas actuales de la cuenca, al igual que en la predicción histórica, y utiliza la información de lluvias y temperaturas mensuales a 6 meses, correspondientes a cada una de las realizaciones (51 members) y a la predicción media del modelo de predicción estacional del clima ECMWF System (Figura 10).

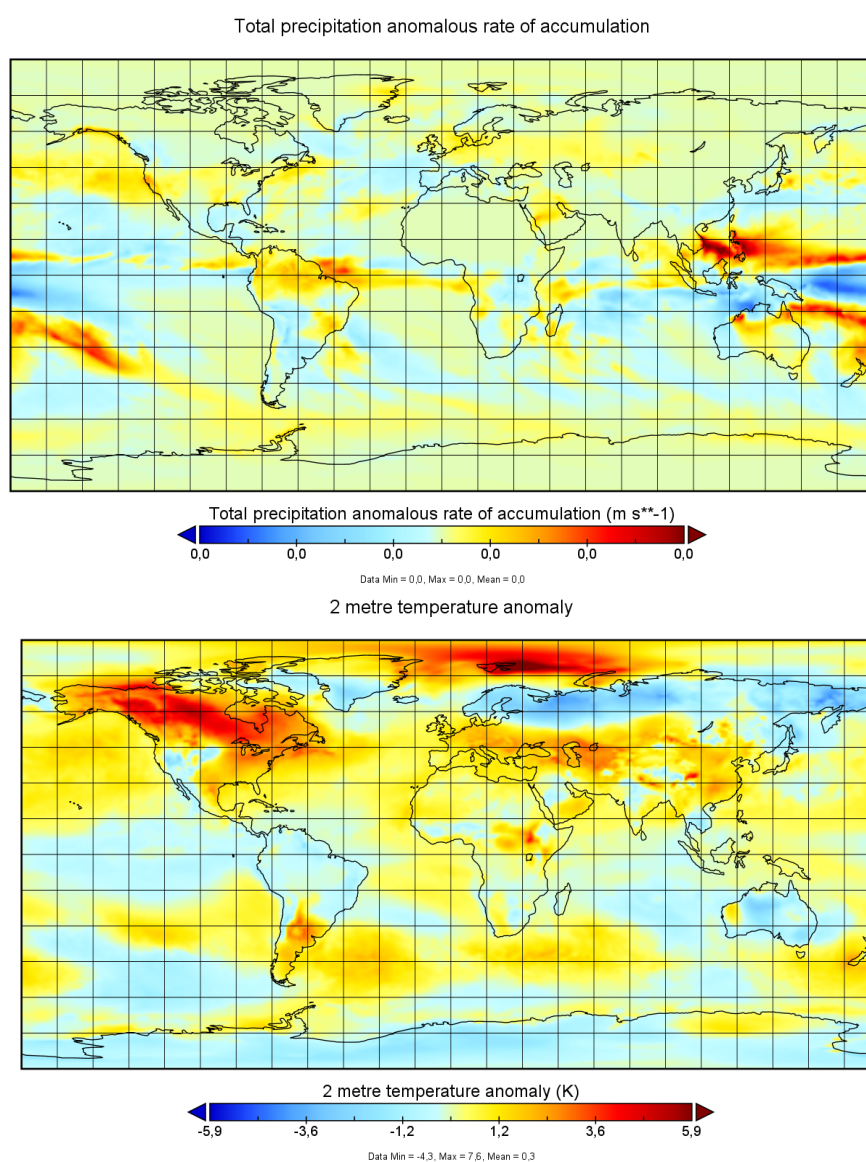
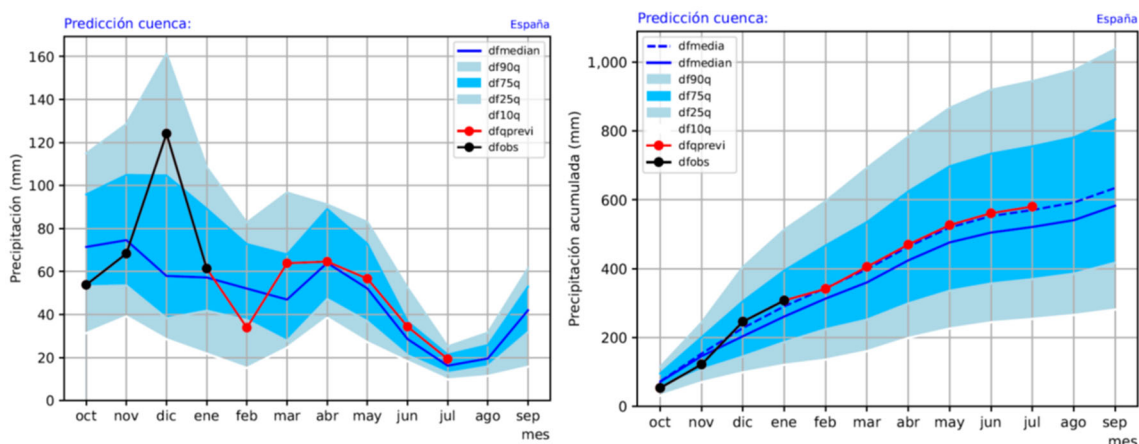


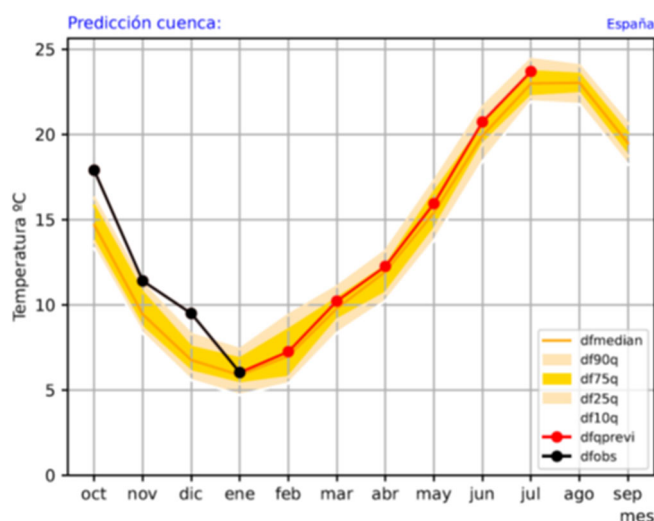
Figura 10. Anomalía en predicción media meteorológica estacional modelo ECMWF-System 5.1, precipitación mensual (arriba) y temperatura mensual (abajo).



El modelo ECMWF facilita la precipitación mensual de los siguientes 6 meses, para cada una de las realizaciones (51 members) y para la predicción media. La precipitación mensual observada (línea negra) junto con la predicción meteorológica media para los próximos 6 meses (línea roja), realizada a inicios de febrero de 2023, indica que se producirán unas lluvias muy similares a lo que es el año medio (Figura 11 izquierda), siendo el conjunto del año un año de lluvia acumulada similar a la media (Figura 11 derecha).



En los meses de octubre, noviembre y diciembre la temperatura media se ha situado significativamente por encima de los registros históricos (Figura 12 línea negra), siendo similar la temperatura de enero a la temperatura media. Las predicciones de temperatura para los próximos meses dan, también, valores similares a la media histórica (Figura 12 línea roja).





El modelo ECMWF proporciona 51 posibles realizaciones (members) de precipitación y temperatura a 6 meses. Cada una de estas realizaciones se simulan con el modelo hidrológico (línea gris en Figura 13 izquierda), de forma que se obtiene el conjunto de resultados hidrológicos a 6 meses (ensemble). A partir del conjunto de realizaciones se puede obtener la predicción climática media y la incertidumbre de la predicción, definida como la horquilla de predicción entre el percentil 75 y el 25% (líneas verdes en la Figura 13 derecha).

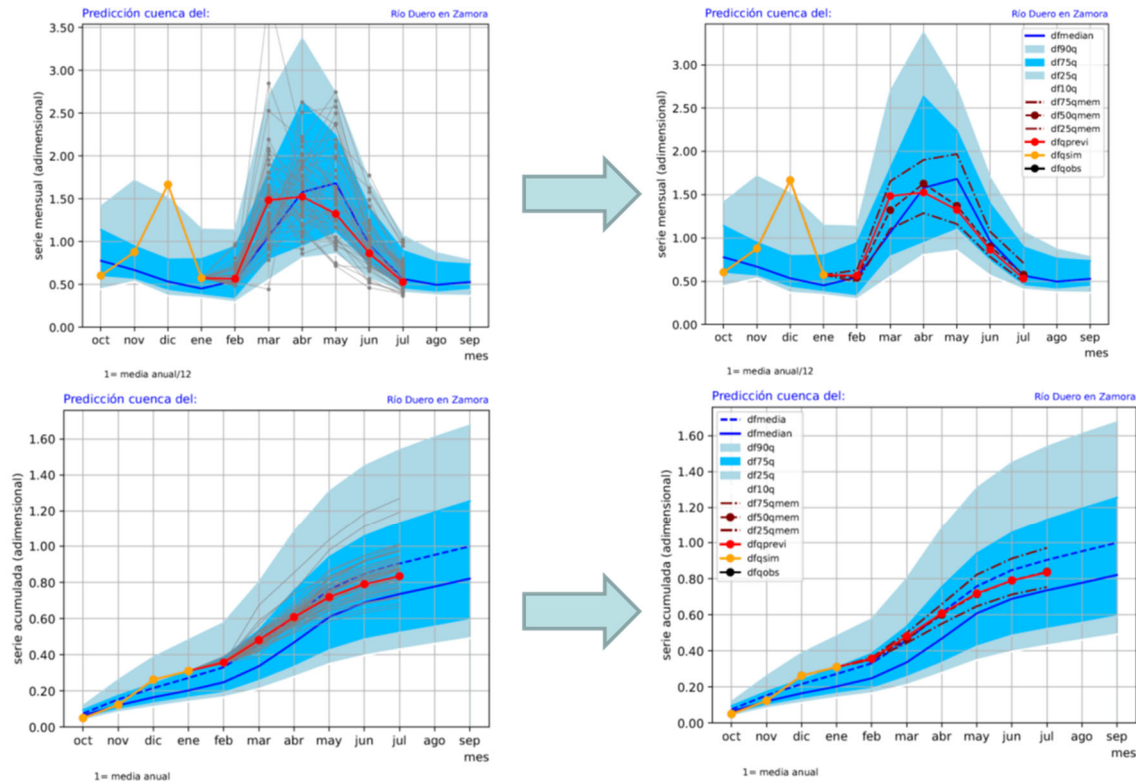


Figura 13. Predicción hidrológica estacional del río Duero en Zamora basada en la predicción climática del modelo ECMWF System-5, resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023. Predicción individual (members, izquierda) mensual (arriba) y acumulada (abajo) y conjunto de la predicción con la media y la banda de confianza (derecha) mensual (arriba) y acumulada (abajo)



2.4 Predicción conjunta histórica y modelo

La combinación de ambas predicciones estacionales hace más robusta la predicción hidrológica estacional, con un doble procedimiento. En primer lugar, la predicción basada en los datos de lluvia y temperatura histórica proporciona la horquilla (líneas verdes), el rango, de las aportaciones futuras hasta el final del año hidrológico basado en lo sucedido hasta el momento de realizar la predicción (línea naranja). En segundo lugar, la predicción media del modelo de clima (línea roja), indica cual sería la zona donde es más probable que se produzca la predicción hidrológica dentro de la horquilla determinada anteriormente.

En el ejemplo de las aportaciones del río Duero en Zamora, para el caso de realizar las predicciones a inicios de febrero de 2023, en primer lugar, la predicción histórica indica que la aportación del río en el conjunto del año hidrológico sería similar a la aportación media del río, con una posible variación de $\pm 20\%$, con lo que queda perfectamente definida la horquilla de variación de las aportaciones de una forma bastante precisa. En segundo lugar, la predicción basada en el modelo de clima ECMWF, indica que dentro de esa horquilla parece que las predicciones meteorológicas muestran mayor probabilidad en la zona baja de la horquilla, por lo que la predicción sería de unas aportaciones del entorno del 90% de la aportación media del río, lo que se corresponde en este caso con una aportación algo superior a la mediana del río.

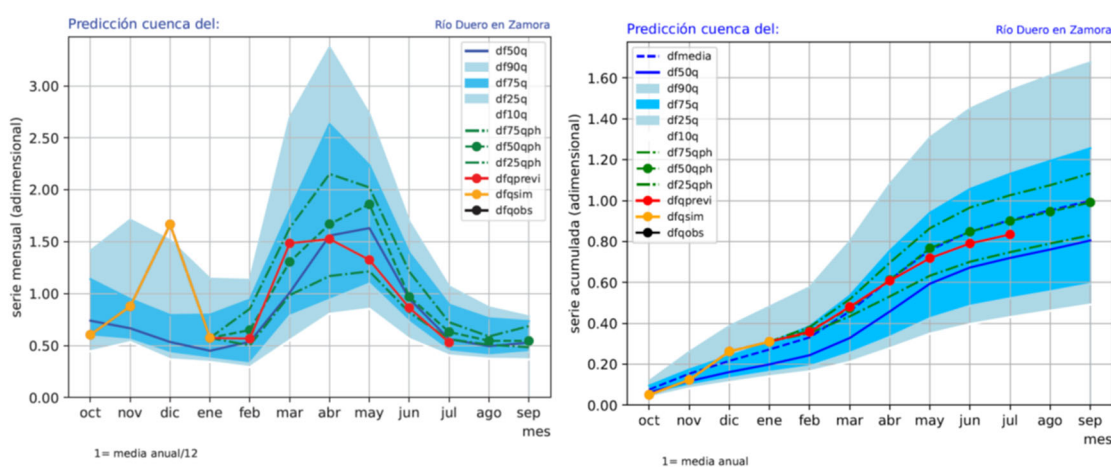


Figura 14. Combinación de la predicción hidrológica estacional basada en los datos históricos y en el modelo de clima ECMWF, resultados en el caso de realizar las predicciones desde inicio de febrero 2023.

Por otra parte, en el caso que las lluvias o temperaturas realmente producidas se desviasen de la predicción realizada con el modelo ECMWF, las aportaciones finales seguirían estando dentro de la horquilla de la predicción hidrológica basada en los datos históricos, de forma que la aplicación de ambos métodos le da mayor robustez al sistema de predicción hidrológica estacional.



3 Resultados sistema predicción cuencas intercomunitarias

Los resultados del sistema de predicción de aportaciones en régimen natural para cuencas intercomunitarios, se ha implementado en una primera fase, con la incorporación de 80 puntos de control, al objeto de disponer de una amplia red de información en las cuencas intercomunitarias. Esta red de puntos puede ser fácilmente ampliada en el actual sistema de predicción.

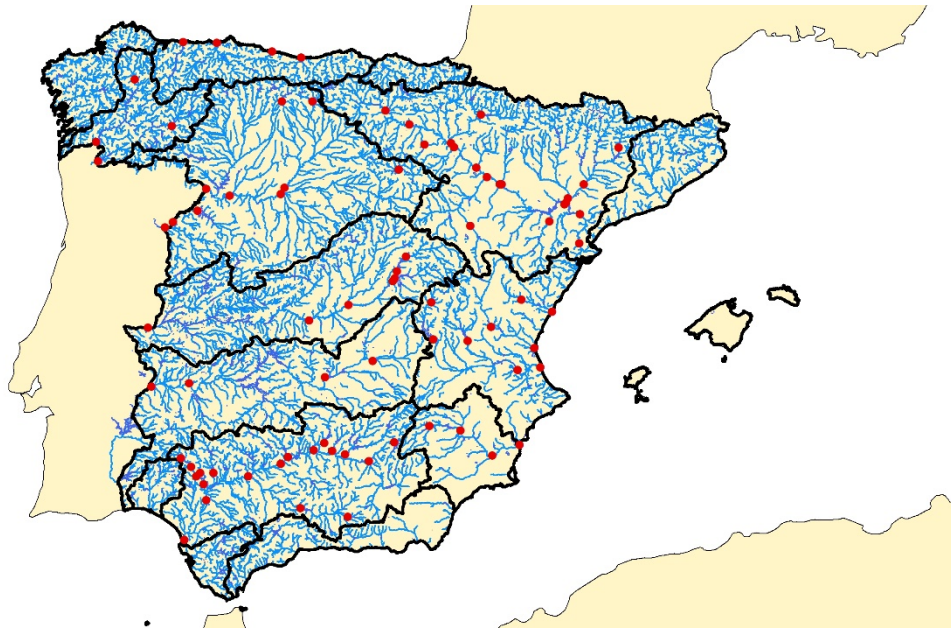


Figura 15. Red de 80 puntos de predicción hidrológica estacional en las cuencas intercomunitarias.

En la tabla siguiente se muestra el ajuste del modelo de simulación en régimen natural con los caudales observados o restituidos a régimen natural en algunos de los puntos utilizados para el periodo histórico de los últimos años. La tabla incluye la desviación media relativa (bias, 0.10 indica 10%), el coeficiente de Nash (Nash and Sutcliffe's, 1970), la evaluación del ajuste según Moriasi et al. (2007) y el punto próximo donde ha sido evaluado.



Demarcació	Pes	Nombre del punto	bia	Nas	Ajuste	Lugar evaluad
Miño-Sil	0.00	Río Limia completo embalse de Linoso	-0.10	0.61	Bueno	Embalse Conchas
Miño-Sil	0.00	Río Miño en Lugo	0.09	0.77	Muy bueno	Lugo
Miño-Sil	0.00	Río Sil medio embalse de Pumares	0.15	0.12	Aceptable	Sil San Pedro
Miño-Sil	1.00	Río Miño (embalse de Frieria)	0.26	0.18	Aceptable	Frieria
Cantábrico	0.13	Río Deva (Cares) en desembocadura	0.16	0.40	Aceptable	Puentelles
Cantábrico	0.14	Río Sella en Ribadesella	0.03	0.53	Satisfactorio	Cangas de Onís
Cantábrico	0.46	Río Nalón	-0.08	0.64	Satisfactorio	Aforo Grado
Cantábrico	0.27	Río Navía	0.15	0.31	Aceptable	Arbón
Duero	0.00	Río Duero embalse de Cuerda del Pozo				
Duero	0.00	Río Pisuerga en el embalse de Aguilar de Campoo				
Duero	0.00	Río Carrión en Guardo				
Duero	0.00	Río Pisuerga en Valladolid	-0.11	0.08	Aceptable	Valladolid
Duero	0.00	Río Adaja completo				
Duero	0.00	Río Duero en Zamora				
Duero	0.00	Río Duero aguas arriba del Tormes (emb Castro, Villalcampo)				
Duero	0.00	Río Tormes embalse de La Almendra	-0.28	0.27	Aceptable	La Almendra
Duero	0.00	Río Duero en embalse Saucelle	-0.13	0.07	Aceptable	Saucelle
Duero	1.00	Río Duero en la frontera (San Martín)				
Tajo	0.00	Río Tajo en Trillo	0.06	0.09	Aceptable	Trillo
Tajo	0.00	Río Tajo embalse de Entrepeñas				
Tajo	0.00	Río Guadiela-Tajo embalse de Buendía				
Tajo	0.00	Río Tajo embalse de Bolarque				
Tajo	0.00	Río Tajo en Aranjuez				
Tajo	0.00	Río Tajo en Castrejón				
Tajo	1.00	Río Tajo cola embalse del Cedillo	-0.12	0.49	Aceptable	Cedillo
Guadiana	0.00	Río Guadiana embalse de Guadiana II				
Guadiana	0.00	Río Guadiana embalse de El Vicario				
Guadiana	0.00	Río Guadiana en Merida				
Guadiana	1.00	Río Guadiana azud de Badajoz, zona española				
Guadalquivir	0.00	Río Guadalquivir embalse del Tranco de Beas	-0.05	0.76	Muy bueno	Tranco de Beas
Guadalquivir	0.00	Río Guadiana Menor desembocadura en el Guadalquivir	0.20	0.17	Aceptable	La Bolera
Guadalquivir	0.00	Río Guadalquivir completo	0.22	0.77	Satisfactorio	Guadalema
Guadalquivir	0.00	Río Rumberal completo				
Guadalquivir	0.00	Río Jandula embalse de Encinarejo				
Guadalquivir	0.00	Río Guadalquivir embalse de El Marmolejo				
Guadalquivir	0.00	Río Guadalmellato embalse de San Rafael				
Guadalquivir	0.00	Río Guadalquivir en Cordoba	0.13	0.36	Aceptable	Posadas
Guadalquivir	0.00	Río Genil en Granada				
Guadalquivir	0.00	Río Genil embalse de Iznajar				
Guadalquivir	0.00	Río Genil completo (Presa del Judío)	-0.01	0.32	Aceptable	Presa
Guadalquivir	0.00	Río Viar embalse de Los Melonares				
Guadalquivir	0.00	Rivera de Cala embalse de Cala	0.15	0.86	Satisfactorio	Cala
Guadalquivir	0.00	Rivera de Huelva embalse de la Aracena	0.33	0.72	Aceptable	Aracena
Guadalquivir	0.00	Rivera de Huelva embalse de Zufre				
Guadalquivir	0.00	Rivera de Huelva embalse de La Minilla				
Guadalquivir	0.00	Rivera de Huelva embalse de El Gergal				
Guadalquivir	0.00	Río Guadalquivir en Sevilla				
Guadalquivir	1.00	Río Guadalquivir (Sanlúcar)	0.06	0.22	Aceptable	Sanlúcar

Tabla 1. Ajuste en régimen natural de los resultados del modelo de simulación con los caudales observados o restituidos a régimen natural. Cuencas Miño-Sil, Cantábrico, Duero, Tajo, Guadiana y Guadalquivir.



Demarcación	Peso	Nombre del punto	bias	Nash	Ajuste	Lugar evaluado
Segura	0.00	Río Segura embalse de La Fuensanta	0.20	0.45	Aceptable	La Fuensanta
Segura	0.00	Río Mundo embalse de Camarillas	0.00	0.35	Aceptable	Camarillas
Segura	0.00	Río Segura en Murcia	-0.06	0.05	Aceptable	Contraparada
Segura	1.00	Río Segura desembocadura				
Júcar	0.00	Embalse de Arenós	0.09	0.57	Satisfactorio	Arenós
Júcar	0.15	Río Mijares: delta del Mijares - mar	0.11	0.69	Bueno	Sichar
Júcar	0.00	Embalse de Benagéber				
Júcar	0.18	Río Turia: nuevo cauce - mar				
Júcar	0.00	Río Júcar: azud de Villalba - río Huécar	0.06	0.36	Aceptable	Cuenca
Júcar	0.00	Embalse de Alarcón	0.08	0.55	Satisfactorio	Alarcón
Júcar	0.00	Embalse de Contreras	-0.04	0.61	Satisfactorio	Contreras
Júcar	0.00	Embalse de Tous	-0.03	0.50	Satisfactorio	Tous
Júcar	0.66	Desembocadura del Júcar	0.05	0.48	Aceptable	Azud Sueca
Ebro	0.00	Río Ebro en Miranda de Ebro	0.01	0.17	Aceptable	Miranda
Ebro	0.00	Río Ebro embalse de el Cortijo	0.10	0.16	Aceptable	Mendavia
Ebro	0.00	Río Cidacos en Arnedillo				
Ebro	0.00	Río Aragón embalse de Yesa				
Ebro	0.00	Río Aragón desembocadura en el Ebro	-0.08	0.10	Aceptable	Desembocadura
Ebro	0.00	Río Ebro en Castejón	0.27	0.08	Aceptable	Castejón
Ebro	0.00	Río Arba completo desembocadura en el Ebro				
Ebro	0.00	Río Jiloca en Daroca				
Ebro	0.00	Río Jalón completo desembocadura en el Ebro	-0.16	0.40	Aceptable	Grisen
Ebro	0.00	Río Gállego completo desembocadura en el Ebro				
Ebro	0.00	Río Ebro en Zaragoza				
Ebro	0.00	Río Guadalupe embalse de Caspe	-0.15	0.34	Aceptable	Embalse Santolea
Ebro	0.00	Río Ebro en el embalse de Mequinenza				
Ebro	0.00	Río Cinca completo desembocadura en el Segre	0.08	0.28	Aceptable	Embalse Mediano
Ebro	0.00	Río Segre en el embalse de Oliana				
Ebro	0.00	Río Segre en el aforo de Lleida				
Ebro	0.00	Río Segre completo	-0.08	0.33	Aceptable	Desembocadura
Ebro	0.00	Río Ebro en el embalse de Flix				
Ebro	1.00	Río Ebro en el aforo E-27 Tortosa	-0.07	0.18	Aceptable	Tortosa

Tabla 2. Ajuste en régimen natural de los resultados del modelo de simulación con los caudales observados o restituidos a régimen natural. Cuencas Segura, Júcar y Ebro.

Los resultados mostrados de la predicción hidrológica estacional incluyen: las aportaciones mensuales hasta final del año hidrológico, las aportaciones mensuales acumuladas hasta el final del año hidrológico, el gráfico de terciles y la tabla con los valores de la aportación predicha respecto la aportación anual media. El contenido detallado se describe a continuación.

El gráfico de aportaciones mensuales muestra la evolución de las aportaciones durante el año hidrológico, hasta el momento de la predicción, y la predicción hasta el final del año hidrológico en régimen natural. Los resultados se muestran en valores adimensionales siendo uno igual a la aportación mensual media, aportación anual media en régimen natural del punto considerado dividido entre 12.

El color azul representa la base histórica de aportaciones mensuales en régimen natural, siendo: la línea azul la aportación mensual correspondiente al percentil 50% (la mediana), el área azul oscuro la horquilla de aportaciones entre el percentil 25% y el percentil 75%, y el área azul claro el rango hasta el percentil 10% y el 90%. El área azul determina si las aportaciones obtenidas se sitúan más o menos distantes a los valores más habituales (mediana, línea azul).

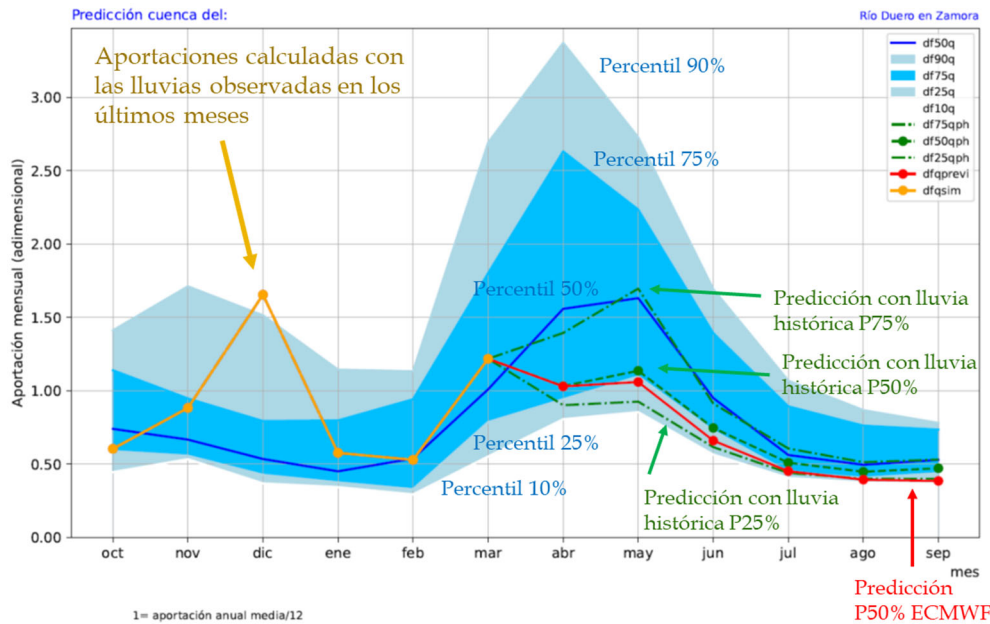


Figura 16. Aportaciones mensuales calculadas y predicción hasta final del año hidrológico, predicciones calculadas en abril de 2023.

La línea de color naranja se corresponde con las aportaciones calculadas teniendo en cuenta la lluvia y temperatura de los últimos meses y las condiciones iniciales de la cuenca hidrográfica. Este cálculo permite actualizar las condiciones iniciales de la cuenca hidrográfica hasta el inicio de la predicción hidrológica.

Las líneas verdes se corresponden con la predicción mensual realizada a partir de los mapas de lluvia y temperatura históricos, que incluyen la predicción centrada, percentil 50% línea continua, y el rango de la predicción definidos por los percentiles de 25% y del percentil 75% (líneas discontinuas). Finalmente, la línea roja se corresponde con la predicción media obtenida a partir de las lluvias y temperaturas del ECMWF.

El gráfico de aportaciones acumuladas hasta el final del año hidrológico, esta formado por el mismo tipo de información con el mismo código de colores que el gráfico anterior. El valor 1 corresponde a la aportación anual media del punto considerado en régimen natural, de forma que por ejemplo el valor 0.8 indica 80% de la aportación anual media.

Las líneas azules, se corresponden con los datos históricos de aportaciones en régimen natural. La línea naranja representa las aportaciones acumuladas calculadas con los mapas de lluvias y temperaturas observadas en los últimos meses. Las líneas verdes se corresponden con las predicciones calculadas usando los mapas de lluvias históricas y la línea roja las aportaciones acumuladas usando los mapas de lluvia y temperatura de la predicción climática estacional del ECMWF.

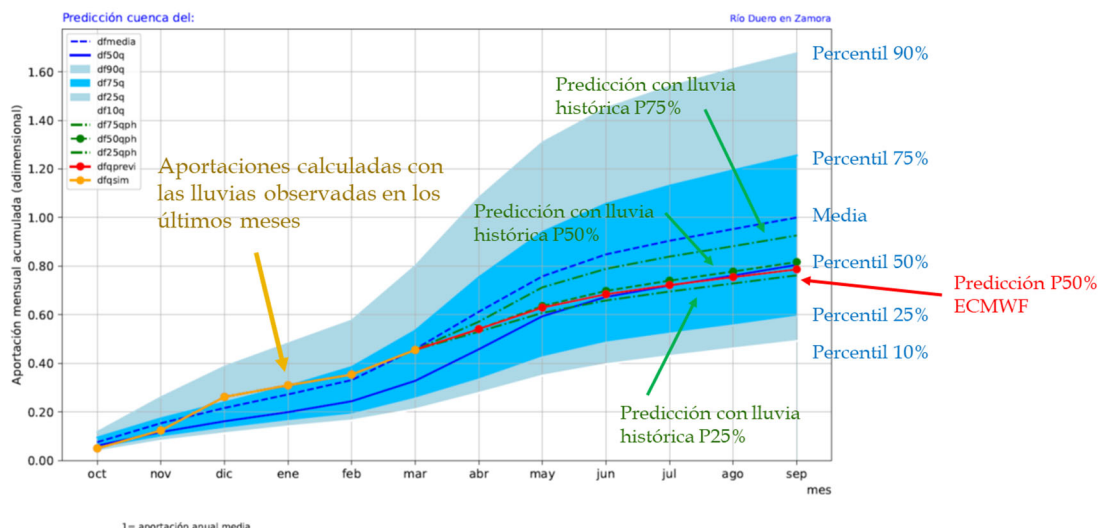


Figura 17. Aportaciones mensuales acumuladas calculadas y predicción hasta final del año hidrológico, predicciones calculadas en abril de 2023.

Los valores correspondientes al mes de septiembre representan el conjunto del año hidrológico. En el ejemplo indicado, la predicción media para este punto muestra que la aportación sería del 80% de la aportación anual en régimen natural, siendo prácticamente igual la predicción realizada con los mapas históricos de lluvia que con los mapas del modelo del clima ECMWF. Esta predicción también presenta una horquilla entre 0.93 y 0.76, lo que indica que la aportación estaría entre un 76% de la aportación media y un 93% de la aprobación media, asociado a los percentiles del 25% y del 75%.



El tercer gráfico muestra la probabilidad de ocurrencia de los terciles seco, medio y húmedo para las aportaciones acumuladas. De esta forma, la columna de septiembre proporciona la información correspondiente al año completo. En el ejemplo se muestra, que la probabilidad de acabar con un año húmedo es sólo del 6%, mientras que la probabilidad de acabar con un año seco es del 53%.

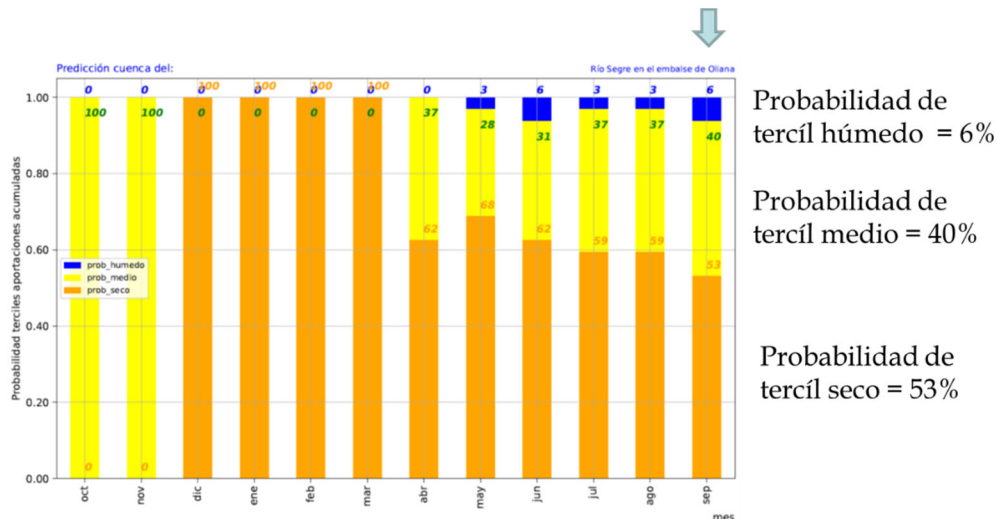


Figura 18. Probabilidad de ocurrencia de los terciles húmedo, medio y seco, predicciones calculadas en abril de 2023.

Finalmente, se proporciona los valores numéricos de la predicción basada en los mapas de lluvia históricos para el conjunto del año hidrológico. El primer número indica que la predicción centrada (percentil 50%), muestra que la aportación anual sería un 82% de la aportación anual media en régimen natural. Los siguientes números muestran la horquilla de variación de la predicción, lo cual indica que la aportación estaría entre un 76% y un 93% de la aportación anual media asociados a los percentiles del 25% y del 75%. De esta forma se proporciona la estimación de la predicción más probable y el rango de variación calculado para dicha predicción.

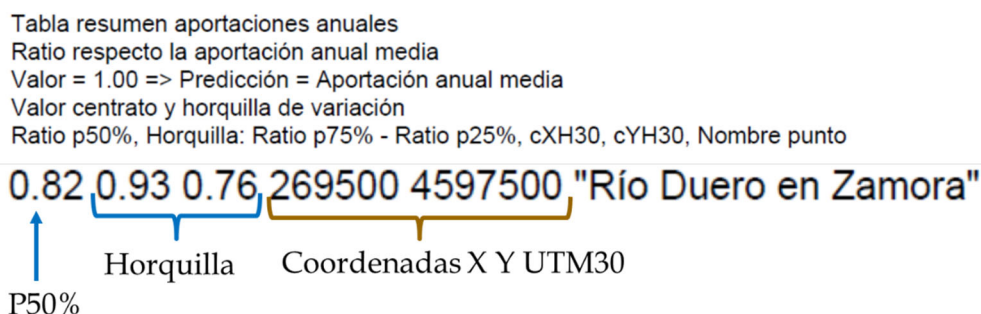


Figura 19. Resultados numéricos año hidrológico.

Finalmente, se proporciona las coordenadas UTM, para el huso 30, y la descripción del nombre del punto asignada.



4 Conclusiones

Los avances en predicción climática estacional hacen que sea posible la realización de la predicción hidrológica estacional, con el objetivo de conocer la evolución futura de los recursos hídricos en España. La combinación de la predicción hidrológica estacional a partir de los datos históricos de lluvia y temperatura con la predicción basada en el modelo de clima ECMWF System-5 hacen que la predicción hidrológica estacional sea más robusta y fiable. Además, puede conocerse en cada momento la horquilla de variación de la predicción y si dentro de esa horquilla la predicción climática tiene una tendencia hacia una zona u otra.

La predicción propuesta incluye dos fases. En la primera fase, la predicción basada en los datos históricos de lluvia y temperatura proporciona la horquilla de variación de las aportaciones hasta el final del año hidrológico con bastante precisión, teniendo en cuenta las lluvias y temperaturas ocurridas en la cuenca en los últimos meses. En la segunda fase, la predicción basada en el modelo de clima, ECMWF System-5, determina que zona de esa horquilla anterior es la más probable que se produzca de forma que puede tenerse un conocimiento muy preciso de las aportaciones futuras en las diferentes cuencas hidrográficas.

La combinación de ambas predicciones permite además saber el rango de variación posible de las aportaciones hasta el final del año hidrológico con bastante precisión, de forma que cambios o desviaciones de la previsión climática basada en el modelo ECMWF respecto de las precipitaciones y temperaturas que realmente se produzcan quedan bastante acotadas dentro de la horquilla de la predicción histórica.

En base a los análisis realizados, se recomienda la aplicación de los dos métodos de predicción estacional, la actualización mensual de las predicciones hidrológicas estacionales y el seguimiento de las predicciones a lo largo del año, para determinar los momentos clave de la predicción.



5 Referencias

- CEDEX, 2017 *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España*. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.
- Estrela T, Pérez-Martín MA, Vargas E (2012) *Impacts of Climate Change on Water Resources in Spain*. *Hydrological Sciences Journal*. 57(6):1154-1167. AC: Estrela T. JCR Q2 y SCImago Q1 WATER RESOURCES. Citas 110. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.702213>
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL (2007) *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 50(3):885–900, doi:10.13031/2013.23153
- Nash JE, Sutcliffe JV (1970) *River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles*, *J. Hydrol.*, 10:282-290
- Pérez-Martín MA, Estrela T, Andreu J and Ferrer J (2014) *Modeling Water Resources and River-Aquifer Interaction in the Júcar River Basin, Spain*. *Water Resour Manage* (2014) 28:4337–4358. Citas 36. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0755-3>
- Pérez-Martín, Miguel Ángel; A Batán; Patricia del; Moll Montaner, Sara (2015) *Climate change impact on water resources and droughts of AR5 scenarios in the Jucar River, Spain*. Libro: *DROUGHT: Research and Science-Policy Interfacing* (ISBN 978-1-138-02779-4). Editorial: CRC Press, a BALKEMA Book. Taylor & Francis Group, London. Capítulo 27 páginas: 189 – 195. Año: 2015.
- Pérez-Martín MA, Estrela T, del-Amo P. 2016 *Measures required to reach the nitrate objectives in groundwater based on a long-term nitrate model for large river basins (Júcar, Spain)*. *Science of the Total Environment* 566–567 (2016) 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.206>
- WMO, 2021. *Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction* (WMO-No. 1274)