

Datos y Metodología

4.1 Datos Biológicos

Los datos de distribución real empleados proceden de las bases de datos del Inventario Nacional de Biodiversidad (cuadrículas UTM de 10x10 km) del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. No todas las especies presentes en las mencionadas bases de datos han sido empleadas en las modelizaciones. Por una parte, ha sido necesario excluir especies que aparecen en muy pocas cuadrículas UTM de 10x10 km. Dado que los modelos estadísticos requieren un número mínimo de observaciones para generar proyecciones útiles (Stockwell & Peterson 2003), se decidió modelar las especies presentes en 15 o más cuadrículas UTM. El umbral de presencia en 15 cuadrículas UTM fue determinado en función al número de variables ambientales utilizadas para calibrar los modelos. Así, la regla general fue considerar un mínimo de 5 ocurrencias por especie y variable, de manera que, con tres variables, el número mínimo por especie es de 15 cuadrículas.

Por otra parte, se decidió excluir las especies insula-

res, marinas, costeras y aquellas cuya ecología es dependiente, fundamentalmente, de ambientes acuáticos. Ello es debido a que se consideró que la metodología adoptada para la modelización de las especies terrestres no resultaría adecuada para ellas, debido a las peculiaridades del medio en que están presentes.

Tampoco se han considerado los mamíferos quirópteros en este trabajo, fundamentalmente porque sus distribuciones presentan actualmente bastante incertidumbre y sus peculiaridades ecológicas, en especial el uso de refugios invernales y diurnos, aconsejarían una metodología especialmente adaptada a ellos.

De este modo, el trabajo se realiza con 27 especies de anfibios, 33 de reptiles, 61 de mamíferos y 171 de aves (Tabla 1); en total, 292 especies de vertebrados terrestres de España. Los datos fueron agrupados en una base de datos común e integrados en un Sistema de Información Geográfica. La figura 1 agrupa esta información mostrando los actuales patrones de riqueza para las especies empleadas.

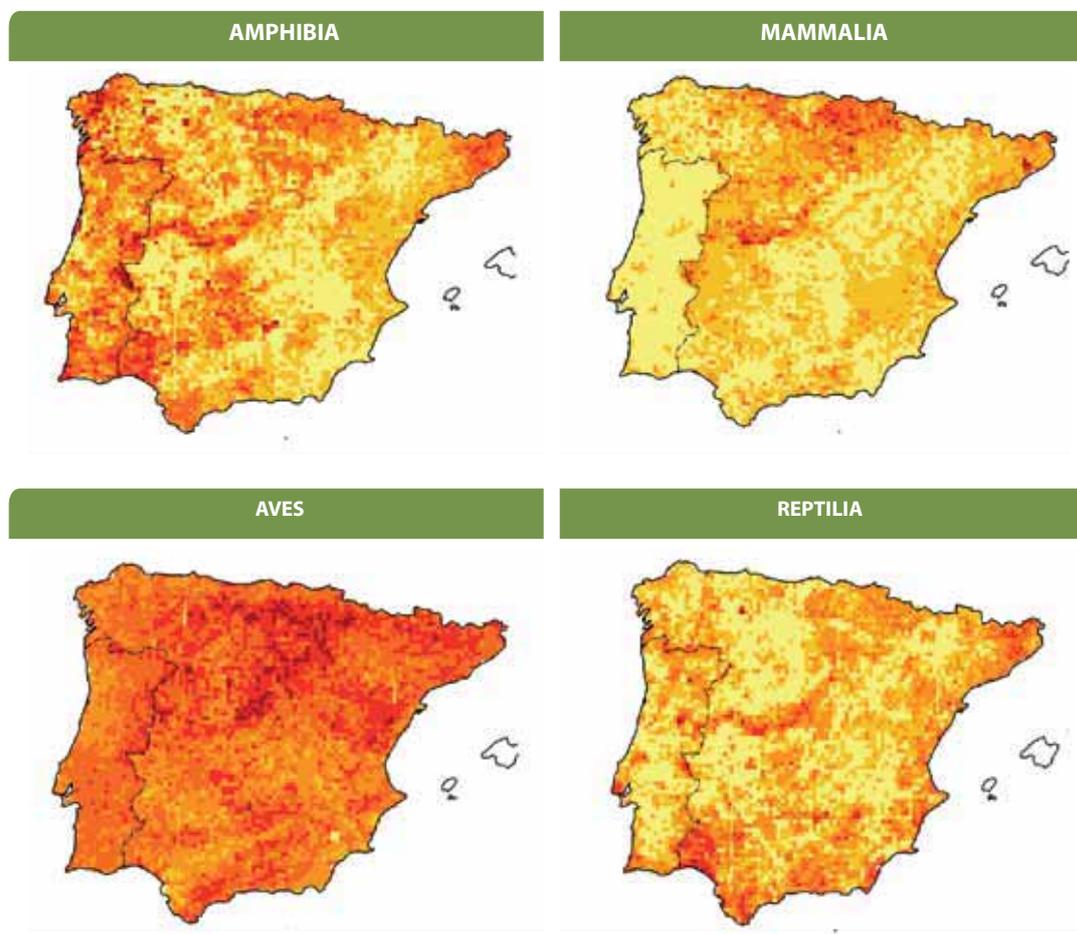


FIGURA 1 – RIQUEZA DE ANFIBIOS, REPTILES, MAMÍFEROS Y AVES EN EL SISTEMA DE CUADRÍCULAS UTM DE 10X10 KM. Riqueza elevada en color rojo, y menor en color amarillo.

TABLA 1 – ESPECIES MODELIZADAS EN EL ESTUDIO

Anfibios

Alytes cisternasii / Sapo partero ibérico
Alytes dickhilleni / Sapo partero bético
Alytes obstetricans / Sapo partero común
Bufo bufo / Sapo común
Bufo calamita / Sapo corredor
Chioglossa lusitanica / Salamandra rabilarga
Discoglossus galganoi / Sapillo pintojo ibérico
Discoglossus jeanneae / Sapillo pintojo meridional
Discoglossus pictus / Sapillo pintojo mediterráneo
Euproctus asper / Tritón pirenaico
Hyla arborea / Ranita de San Antonio
Hyla meridionalis / Ranita meridional
Lissotriton boscai / Tritón ibérico
Lissotriton helveticus / Tritón palmeado
Mesotriton alpestris / Tritón alpino
Pelobates cultripipes / Sapo de espuelas
Pelodytes ibericus / Sapillo moteado ibérico
Pelodytes punctatus / Sapillo moteado común
Pleurodeles waltl / Gallipato
Rana dalmatina / Rana ágil
Rana iberica / Rana patilarga
Rana perezi / Rana común
Rana pyrenaica / Rana pirenaica
Rana temporaria / Rana bermeja
Salamandra salamandra / Salamandra común
Triturus marmoratus / Tritón jaspeado
Triturus pygmaeus / Tritón pigmeo

Reptiles

Acanthodactylus erythrurus / Lagartija colirroja
Algyroides marchi / Lagartija de Valverde
Anguis fragilis / Lucián
Blanus cinereus / Culebrilla ciega
Chalcides bedriagai / Eslizón ibérico
Chalcides striatus / Eslizón tridáctilo ibérico
Chamaeleo chamaeleon / Camaleón común
Coronella austriaca / Culebra lisa europea
Coronella girondica / Culebra lisa meridional
Hemidactylus turcicus / Salamquesa rosada
Hemorrhois hippocrepis / Culebra de herradura
Hierophis viridiflavus / Culebra verdiamarilla
Iberolacerta bonnali / Lagartija pirenaica
Iberolacerta monticola / Lagartija serrana
Lacerta bilineata / Lagarto verde
Lacerta lepida / Lagarto ocelado
Lacerta schreiberi / Lagarto verdinegro
Lacerta vivipara / Lagartija de turbera
Macropododon brevis / Culebra de cogulla
Malpolon monspessulanus / Culebra bastarda

Podarcis bocagei / Lagartija de Bocage
Podarcis carbonelli / Lagartija de Carbonell
Podarcis hispanica / Lagartija ibérica
Podarcis muralis / Lagartija roquera
Psammotromus algirus / Lagartija colilarga
Psammotromus hispanicus / Lagartija cenicienta
Rhinechis scalaris / Culebra de escalera
Tarentola mauritanica / Salamanquesa común
Testudo graeca / Tortuga mora
Vipera aspis / Víbora áspid
Vipera latasti / Víbora hocicuda
Vipera seoanei / Víbora de Seoane
Zamenis longissimus / Culebra de esculapio

Aves

Accipiter gentilis / Azor común
Accipiter nisus / Gavilán común
Aegithalos caudatus / Mito
Aegolius funereus / Mochuelo boreal
Aegypius monachus / Buitre negro
Alauda arvensis / Alondra común
Alcedo atthis / Martín pescador común
Alectoris rufa / Perdiz roja
Anthus campestris / Bisbita campestre
Anthus spinoletta / Bisbita alpino
Anthus trivialis / Bisbita arbóreo
Apus apus / Vencejo común
Apus caffer / Vencejo cafre
Apus pallidus / Vencejo pálido
Aquila adalberti / Águila imperial ibérica
Aquila chrysaetos / Águila real
Asio flammeus / Búho campestre
Asio otus / Búho chico
Athene noctua / Mochuelo europeo
Bubo bubo / Búho real
Bubulcus ibis / Garcilla bueyera
Bucanetes githagineus / Camachuelo trompetero
Burhinus oedicephalus / Alcaraván común
Buteo buteo / Busardo ratonero
Calandrella brachydactyla / Terrera común
Calandrella rufescens / Terrera marismeña
Caprimulgus europaeus / Chotacabras europeo
Caprimulgus ruficollis / Chotacabras cuellirrojo
Carduelis cannabina / Pardillo común
Carduelis carduelis / Jilguero
Carduelis chloris / Verderón común
Carduelis spinus / Lúgano
Cercotrichas galactotes / Alzacola
Certhia brachydactyla / Agateador común
Certhia familiaris / Agateador norteño

Cettia cetti / Ruiseñor bastardo
Chersophilus duponti / Alondra de Dupont
Ciconia ciconia / Cigüeña blanca
Ciconia nigra / Cigüeña negra
Circaetus gallicus / Culebrera europea
Circus cyaneus / Aguilucho pálido
Circus pygargus / Aguilucho cenizo
Cisticola juncidis / Buitrón
Clamator glandarius / Críalo europeo
Coccothraustes coccothraustes / Picogordo
Columba oenas / Paloma zurita
Columba palumbus / Paloma torcaz
Coracias garrulus / Carraca europea
Corvus corax / Cuervo
Corvus corone / Corneja
Corvus frugilegus / Graja
Corvus monedula / Grajilla
Coturnix coturnix / Codorniz común
Cuculus canorus / Cuco común
Cyanopica cyana / Rabilargo
Delichon urbica / Avión común
Dendrocopos major / Pico picapinos
Dendrocopos medius / Pico mediano
Dendrocopos minor / Pico menor
Dryocopus martius / Picamaderos negro
Elanus caeruleus / Elanio común
Emberiza calandra / Triguero
Emberiza cia / Escribano montesino
Emberiza cirius / Escribano soteño
Emberiza citrinella / Escribano cerillo
Emberiza hortulana / Escribano hortelano
Erithacus rubecula / Petirrojo
Falco naumanni / Cernícalo primilla
Falco peregrinus / Halcón peregrino
Falco subbuteo / Alcotán europeo
Falco tinnunculus / Cernícalo vulgar
Ficedula hypoleuca / Papamoscas cerrojillo
Fringilla coelebs / Pinzón vulgar
Galerida cristata / Cogujada común
Galerida theklae / Cojugada montesina
Garrulus glandarius / Arrendajo
Gypaetus barbatus / Quebrantahuesos
Gyps fulvus / Buitre leonado
Hieraetus fasciatus / Águila-azor perdicera
Hieraetus pennatus / Águila calzada
Hippolais pallida / Zarcero pálido
Hippolais polyglotta / Zarcero común
Hirundo daurica / Golondrina dáurica
Hirundo rustica / Golondrina común
Jynx torquilla / Torcecuello euroasiático

Lagopus mutus / Lagópodo alpino
Lanius collurio / Alcaudón dorsirrojo
Lanius meridionalis / Alcaudón real
Lanius senator / Alcaudón común
Loxia curvirostra / Piquituerto común
Lullula arborea / Totovía
Luscinia megarhynchos / Ruiseñor común
Luscinia svecica / Pechiazul
Melanocorypha calandra / Calandria
Merops apiaster / Abejaruco europeo
Milvus migrans / Milano negro
Milvus milvus / Milano real
Monticola saxatilis / Roquero rojo
Monticola solitarius / Roquero solitario
Montifringilla nivalis / Gorrión alpino
Motacilla alba / Lavandera blanca
Motacilla cinerea / Lavandera cascadeña
Motacilla flava / Lavandera boyera
Muscicapa striata / Papamoscas gris
Neophron percnopterus / Alimoche común
Oenanthe hispanica / Collalba rubia
Oenanthe leucura / Collalba negra
Oenanthe oenanthe / Collalba gris
Oriolus oriolus / Oropéndola
Otis tarda / Avutarda común
Otus scops / Autillo europeo
Parus ater / Carbonero garrapinos
Parus caeruleus / Herrerillo común
Parus cristatus / Herrerillo capuchino
Parus major / Carbonero común
Parus palustris / Carbonero palustre
Passer domesticus / Gorrión común
Passer hispaniolensis / Gorrión moruno
Passer montanus / Gorrión molinero
Perdix perdix / Perdiz pardilla
Pernis apivorus / Abejero europeo
Petronia petronia / Gorrión chillón
Phoenicurus ochruros / Colirrojo tizón
Phoenicurus phoenicurus / Colirrojo real
Phylloscopus bonelli / Mosquitero papialbo
Phylloscopus collybita/P.ibericus / Mosquitero común/Mosquitero ibérico
Pica pica / Urraca
Picus viridis / Pito real
Prunella collaris / Acentor alpino
Prunella modularis / Acentor común
Pterocles alchata / Ganga ibérica
Pterocles orientalis / Ganga ortega
Ptyonoprogne rupestris / Avión roquero
Pyrrhocorax graculus / Chova piquigualda

Pyrrhocorax pyrrhocorax / Chova piquirroja
Pyrrhula pyrrhula / Camachuelo común
Regulus ignicapilla / Reyzeuelo listado
Regulus regulus / Reyzeuelo sencillo
Remiz pendulinus / Pájaro moscón
Riparia riparia / Avión zapador
Saxicola rubetra / Tarabilla norteña
Saxicola torquata / Tarabilla común
Scolopax rusticola / Chocha perdiz
Serinus citrinella / Verderón serrano
Serinus serinus / Verdcecillo
Sitta europaea / Trepador azul
Streptopelia decaocto / Tórtola turca
Streptopelia turtur / Tórtola europea
Strix aluco / Cárabo común
Sturnus unicolor / Estornino negro
Sturnus vulgaris / Estornino pinto
Sylvia atricapilla / Curruca capiroxada
Sylvia borin / Curruca mosquitera
Sylvia cantillans / Curruca carrasqueña
Sylvia communis / Curruca zarquera
Sylvia conspicillata / Curruca tomillera
Sylvia hortensis / Curruca mirlona
Sylvia melanocephala / Curruca cabecinegra
Sylvia undata / Curruca rabilarga
Tachymarptis melba / Vencejo real
Tetrao urogallus / Urogallo común
Tetrax tetrax / Sisón común
Tichodroma muraria / Treparriscos
Troglodytes troglodytes / Chochín
Turdus merula / Mirlo común
Turdus philomelos / Zorzal común
Turdus torquatus / Mirlo capiblanco
Turdus viscivorus / Zorzal charlo
Tyto alba / Lechuza común
Upupa epops / Abubilla
Vanellus vanellus / Avefría europea

Mamíferos

Apodemus flavicollis / Ratón leonado
Apodemus sylvaticus / Ratón de campo
Arvicola sapidus / Rata de agua
Arvicola terrestris / Rata topera
Atelerix algirus / Erizo moruno
Canis lupus / Lobo
Capra pyrenaica / Cabra montés
Capreolus capreolus / Corzo
Cervus elaphus / Ciervo
Chionomys nivalis / Topillo nival
Crocidura russula / Musaraña gris

Crocidura suaveolens / Musaraña de campo
Dama dama / Gamo
Eliomys quercinus / Lirón careto
Erinaceus europaeus / Erizo europeo
Felis silvestris / Gato montés europeo
Galemys pyrenaicus / Desmán ibérico
Genetta genetta / Gineta
Glis glis / Lirón gris
Herpestes ichneumon / Meloncillo
Lepus castroviejoi / Liebre de piornal
Lepus europaeus / Liebre europea
Lepus granatensis / Liebre ibérica
Lutra lutra / Nutria
Lynx pardinus / Lince ibérico
Marmota marmota / Marmota alpina
Martes foina / Garduña
Martes martes / Marta
Meles meles / Tejón
Micromys minutus / Ratón espiguero
Microtus agrestis / Topillo agreste
Microtus arvalis / Topillo campesino
Microtus cabraerae / Topillo de Cabrera
Microtus duodecimcostatus / Topillo mediterráneo
Microtus gerbei / Topillo pirenaico
Microtus lusitanicus / Topillo lusitano
Mus musculus / Ratón casero
Mus spretus / Ratón moruno
Mustela erminea / Armiño
Mustela lutreola / Visón europeo
Mustela nivalis / Comadreja
Mustela putorius / Turón
Myodes glareolus / Topillo rojo
Neomys anomalus / Musgaño de Cabrera
Neomys fodiens / Musgaño patiblanco
Oryctolagus cuniculus / Conejo
Ovies aries / Muflón
Rattus norvegicus / Rata parda
Rattus rattus / Rata negra
Rupicapra pyrenaica / Rebeco
Sciurus vulgaris / Ardilla roja
Sorex araneus / Musaraña bicolor
Sorex coronatus / Musaraña tricolor
Sorex granarius / Musaraña ibérica
Sorex minutus / Musaraña enana
Suncus etruscus / Musgaño enano
Sus scrofa / Jabalí
Talpa europaea / Topo europeo
Talpa occidentalis / Topo ibérico
Ursus arctos / Oso pardo
Vulpes vulpes / Zorro

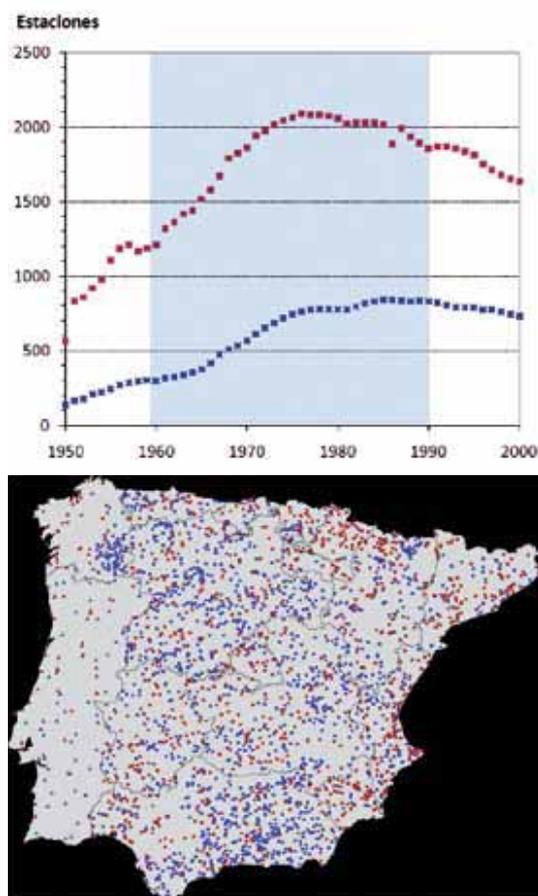


FIGURA 2 – DATOS CLIMÁTICOS. Arriba, evolución del número de estaciones meteorológicas disponibles entre 1950 y 2000; en rojo, estaciones pluviométricas; en azul, estaciones termométricas. Debajo, distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas para elaborar los mapas de clima actual (véase el volumen dedicado a la flora para más detalles).

4.2 Datos del clima actual

La situación climática de referencia fue caracterizada usando datos mensuales procedentes de estaciones meteorológicas, en concreto temperatura y precipitación, facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y del “Instituto de Meteorología” (IM) de Portugal, para el periodo comprendido entre 1961-1990.

Se dispuso de información procedente de 2173 estaciones pluviométricas y 973 termométricas para toda

España peninsular y 89 estaciones pluviométricas y 51 termométricas para Portugal. Los registros no son homogéneos y constantes en el tiempo, por lo que existen variaciones, a veces importantes, respecto a los datos básicos disponibles según las zonas y años (Figura 2).

Estos datos fueron posteriormente interpolados en una cuadrícula 10x10 km, para la totalidad de la Península Ibérica, usando el método de interpolación espacial “co-kriging” (véase el trabajo realizado relativo a la flora para más detalles). Los datos mensuales fueron usados para derivar tres variables climáticas (figura 3) consideradas relevantes para modelar la distribución de la fauna de vertebrados terrestres y que, simultáneamente, presentan un nivel bajo de correlación entre sí. A saber: temperatura máxima del mes más cálido; temperatura mínima del mes más frío; y precipitación anual total. Téngase en cuenta que estas variables sintetizan dos factores (energía y agua), los cuales limitan de forma sustancial la distribución de la diversidad biológica a nivel global (e.g., Hawkins et al. 2003) y europeo (Whittaker et al. 2007).

4.3 Escenarios de emisiones

Definido un modelo, es necesario determinar los factores influyentes en la evolución del clima, es decir, los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero. La definición de escenario que ofrece el IPCC (“Intergovernmental Panel on Climate Change”) es la siguiente: “Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y, en particular, para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. La posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota.”

Esta última frase es importante: los escenarios son solamente opciones y es probable que la realidad futura sea algo diferente a todos ellos, aunque dentro del ámbito de variación global, ya que hay algunos extremos. Existen 4 gran familias de escenarios definidos por el IPCC: A1, A2, B1 y B2. Cada una de ellas es una combinación de tenden-

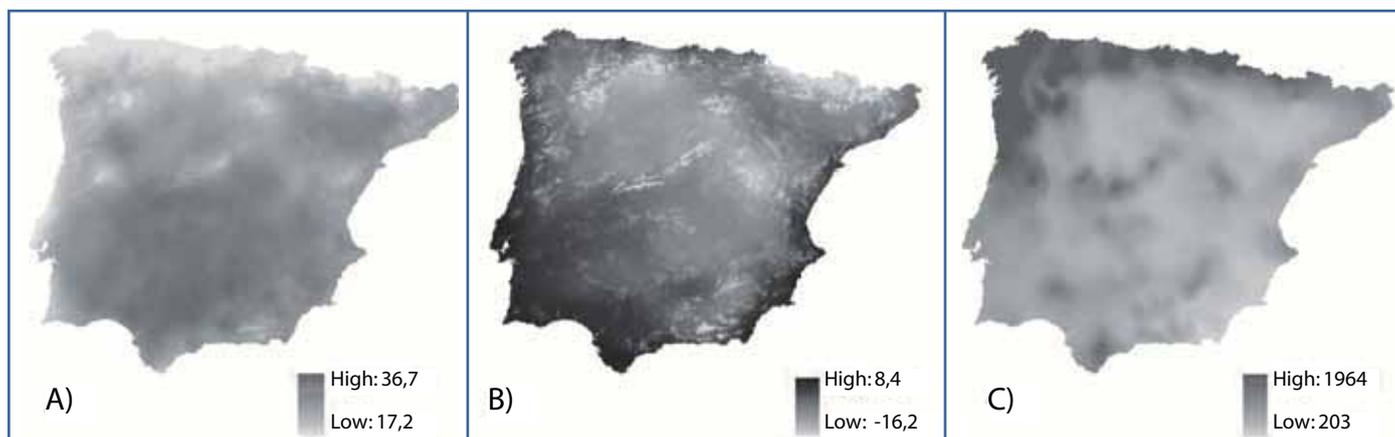


FIGURA 3 – DATOS CLIMÁTICOS INTERPOLADOS, BASADOS EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS: a) temperatura máxima del mes más caliente; b) temperatura mínima del mes más frío; c) precipitación media anual acumulada.

cias demográficas, sociales, económicas, tecnológicas y ambientales. Las definiciones de cada familia pueden encontrarse en el informe del IPCC "Escenarios de emisiones" (Nakicenovic & Swart 2000). Para cada proyección o modelo climático (usamos para identificarlo el nombre del modelo original: CGCM2, ECHAM4 y HadAM3H) hemos considerado dos escenarios de emisiones, A2 y B2, que corresponden a los igualmente denominados del IPCC:

La narrativa ("storyline") y la familia de escenarios A2, describen una situación (o realidad) muy heterogénea. La idea subyacente a estas narrativas es la preservación de la autosuficiencia y la preservación de las identidades locales. Los patrones de fertilidad a lo largo de las regiones convergen muy lentamente, lo cual resulta en una población global en continuo crecimiento. El desarrollo económico se registra, fundamentalmente, a nivel regional; el crecimiento económico per capita y los avances tecnológicos aparecen más despacio y más fragmentados que en otras narrativas.

La narrativa y la familia de escenarios B2, describen una situación en la cual el énfasis se pone en la sostenibilidad económica, social y medioambiental, basadas en soluciones locales. Se trata de una realidad donde el crecimiento global de la población es constante y sucede a menor velocidad que en la situación A2, con niveles de desarrollo económico intermedios, a la vez que ocurren más despacio, pero más variados, los avances tecnológicos que en las narrativas B1 y A1. Además, se trata de un escenario que tiene en cuenta la protección medioambiental y la igualdad social, y que se desarrolla tanto a nivel local como regional.

4.4 Horizontes temporales

Los datos de proyecciones suministrados por la AEMET abarcan el periodo 2011-2100. Para reducir el número de modelos de distribución potencial, pero sin perder información sobre su evolución temporal, los datos se han procesado para obtener valores representativos de tres horizontes temporales: 2011-2040; 2041-2070; 2071-2100.

En consecuencia, para cada combinación de modelo (CGCM2, ECHAM4) y escenarios (A2, B2) habrá tres conjuntos de modelos de distribución potencial correspondientes a cada horizonte temporal. La excepción es el modelo HadAM3H, del que solo se dispone de proyecciones para el periodo 2071-2100. Las figuras 4, 5, y 6 resumen todas las combinaciones incluidas en el trabajo.

Para realizar todo este proceso, se dispone de datos de 1830 estaciones termométricas y 5063 pluviométricas en España. Estos datos contienen la estimación diaria para cada una de las estaciones durante todo el siglo XXI (salvo, como ya se ha mencionado, en el modelo HadAM3H que comprende el periodo 2071-2100), para periodos de 30 años, dentro de cada combinación de modelo y escenario.

4.5 Proceso de los datos climáticos futuros

La información original de la AEMET no pudo ser utilizada directamente para generar mapas climáticos futuros, sino que tuvo que procesarse, de acuerdo con el siguiente esquema de cinco pasos:

- Creación de ficheros digitales de estaciones meteorológicas (puntos).

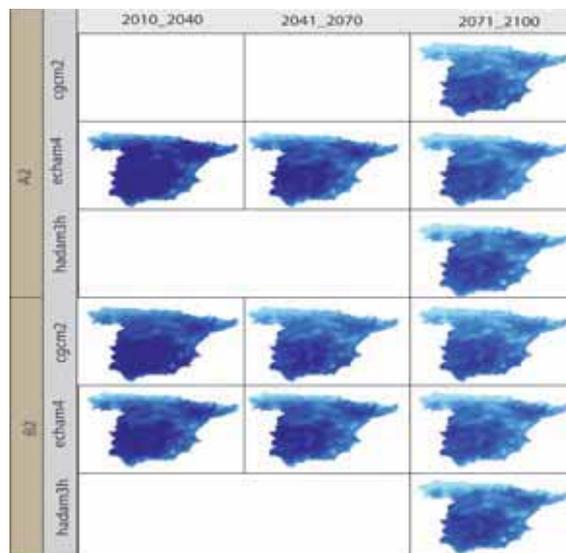


FIGURA 4 – TEMPERATURA MÁXIMA DEL MES MÁS CÁLIDO (°C) EN LOS PERIODOS DE REFERENCIA. Las proyecciones de climas futuros se basan en simulaciones de tres AOGCM (CGCM2, ECHAM4, hadCM3H) e incluyen los escenarios A2 y B2.

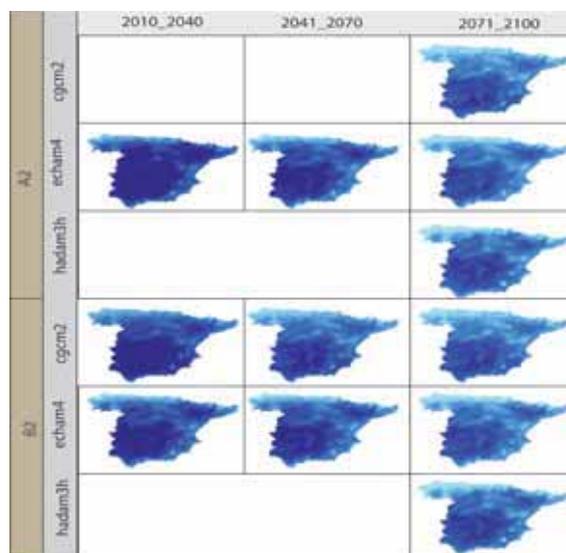


FIGURA 5 – TEMPERATURA MÍNIMA DEL MES MÁS FRÍO (°C) EN LOS PERIODOS DE REFERENCIA. Las proyecciones de climas futuros se basan en simulaciones de tres AOGCM (CGCM2, ECHAM4, hadCM3H) e incluyen los escenarios A2 y B2.

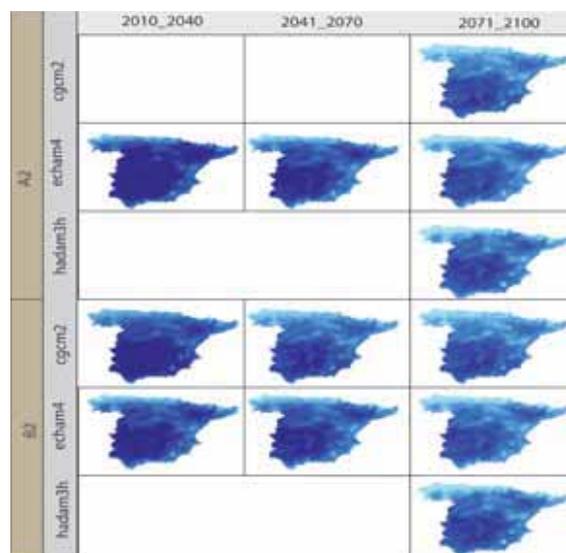


FIGURA 6 – PRECIPITACIÓN ANUAL TOTAL (MM) EN LOS PERIODOS DE REFERENCIA. Las proyecciones de climas futuros se basan en simulaciones de tres AOGCM (CGCM2, ECHAM4, hadCM3H) e incluyen los escenarios A2 y B2.

- Organización de la información climática (datos diarios).
- Cálculo de variables y estadísticos mensuales.
- Corrección del error sistemático de los modelos climáticos AEMET.
- Obtención -para cada horizonte temporal- de estadísticos medios mensuales, para cada variable climática, en las combinaciones de modelo/escenario.

Los pasos 1 a 3 fueron rutinarios y las operaciones específicas son muy dependientes de la estructura de la base de datos. Sin embargo, a la hora de calcular los estadísticos mensuales, se observaron valores anómalos (anormalmente elevados) para las temperaturas máximas. Estos valores se detectaron al analizar los estadísticos máximos y mínimos y se manifestaron por temperaturas cercanas a los 50 °C en algunos casos. Tras un análisis de todos los datos de clima futuro y una identificación de los registros que almacenan los valores extremos se observó que, tanto la aparición de registros nulos como la obtención de estadísticos mensuales anómalos se concentraron en sólo media docena de estaciones. Estas estaciones fueron eliminadas de las interpolaciones posteriores, considerando que su pequeño número no acarrea pérdida de información significativa.

4.6 Corrección del error sistemático en las proyecciones

Como ya se ha comentado, los valores absolutos de las variables climáticas estimados para el futuro en los distintos modelos regionales no pueden ser utilizados directamente. Existe un error sistemático en cada proyección que debe ser corregido. Se corrigió el valor de cada variable, en un periodo futuro concreto, restándole el valor obtenido con el mismo algoritmo para el periodo de control y añadiendo el resultado de esta operación al mismo periodo de la serie de datos del clima actual. Este proceso se realiza en dos pasos:

a) VARIACIÓN ESTIMADA PARA EL PERIODO X = Valor absoluto para el periodo X (futuro) – Valor absoluto para el periodo de control

b) VALOR REAL ESTIMADO PARA EL PERIODO X = Valor real del clima actual + Variación estimada en variable para el periodo X.

O, expresado de otro forma:

VALOR REAL (periodo X) = VALOR ACTUAL + (VALOR BRUTO (X) – VALOR DE CONTROL)

El tratamiento del error sistemático da lugar a una variable intermedia que representa, en cada proyección, la variación de la variable climática entre el dato obtenido para el futuro y el correspondiente dato del control. El valor de corrección, o sesgo, se debió calcular para todas las combinaciones de modelo/escenario/horizonte y para cada variable en cada mes. Dada la variabilidad del factor de corrección y la gran cantidad de combinaciones se incluyó el proceso en el cálculo de los mapas interpolados y no modificando los valores de las bases de datos originales. Obtenidos los mapas de estaciones meteorológicas, los procesos de interpolación y adición de gradientes altitudinales fueron iguales que en los mapas de clima del pasado.

4.7 Calibración de los modelos bioclimáticos

Por calibración se entiende el estudio de las relaciones estadísticas entra la distribución actual de las especies y el clima contemporáneo. Basándose en este proceso, se puede inferir la distribución, potencial actual y futura de las especies, es decir, la distribución de las condiciones climáticas que permiten la presencia de las especies en ausencia de otros impedimentos de carácter biológico y/o relativo a las actividades humanas (e.g.: dispersión limitada, presencia de competidores, uso del suelo inapropiado). Se debe resaltar que el resultado de estos modelos bioclimáticos no constituye una estimación de la distribución geográfica de las especies, sino solamente su distribución potencial climática (para una discusión profundizada de estos conceptos ver Soberón 2007). Realizar estimas sobre la distribución geográfica de las especies implicaría recurrir a metodologías más complejas, esto es, incluir, explícitamente, los mecanismos responsables de las dinámicas poblacionales (e.g., Keith et al. 2008; Anderson et al. 2009), como es el caso de la dispersión, así como la interacción biótica (e.g., Araújo & Luoto 2007). Los modelos que estiman la respuesta de las especies a las alteraciones del clima, basándose en mecanismos poblacionales, todavía se encuentran en fase experimental (Brook et al. 2009) y requieren parámetros que no están disponibles para la mayoría de las especies modeladas, por lo que no fue posible usarlos.

Una comprensión deficiente de las sutilezas conceptuales asociadas a la noción de distribución geográfica y de distribución climática potencial ha conducido, frecuentemente, a una interpretación errónea del significado de los modelos (e.g., Thomas et al. 2004). Por ejemplo, es el caso de la producción de estimas del riesgo de extinción de las especies (calculadas con parámetros poblacionales), basándose en la simple cuantificación de las alteraciones del área climática potencial de las especies (para un debate sobre o tema ver Ladle et al. 2004; Akçakaya et al. 2006). Además de las incertidumbres que se derivan de interpretar incorrectamente los resultados de los modelos (Barry & Elith 2006), es conocido el hecho de que los modelos bioclimáticos producen, frecuentemente, resultados variables cuando son proyectados al pasado y al futuro (e.g., Thuiller et al. 2004; Araújo et al. 2005b; Araújo et al. 2006; Pearson et al. 2006). Una manera de lidiar con esta variabilidad es combinar los resultados individuales de cada uno de los modelos utilizados, de forma que se consiga una proyección “consenso” entre todos ellos (para una revisión del concepto ver Araújo & New 2007). Estudios en ámbitos del conocimiento diferentes, como las ciencias económicas, climáticas o biológicas, han demostrado que las proyecciones de consenso son más fiables que las propias proyecciones individuales que las constituyen. En el caso de los modelos bioclimáticos, una evaluación independiente, recurriendo a datos de distribución de las aves del Reino Unido permitió comprobar, empíricamente, este postulado (Araújo et al. 2005b).

De este modo, la distribución potencial actual y futura de las especies fue modelada con la plataforma informática BIOENSEMBLES 1.0 (“Software for Computer Intensive Ensemble Forecasting of Species Distributions

under Climate Change”), implementada en Delphi (Rangel et al. 2009) y usando un cluster de computación de 10 nodos y 80 hilos de proceso con un total de 80 Gb de RAM. Esta plataforma informática fue programada gracias al proyecto científico BIOIMPACTO, liderado por el Miguel B. Araújo, y financiado por la Fundación BBVA (para una descripción pormenorizada del software ver Diniz-Filho et al. 2009). La utilización de la plataforma BIOENSEMBLES permitió generar un “ensamblaje” de modelos a partir del cálculo explícito de diferentes fuentes de incertidumbre en los modelos. Concretamente, se calcularon incertidumbres provenientes de:

a) Condiciones iniciales: Los datos de distribución de las especies provienen de inventarios nacionales, así como de muestreos que son, forzosamente, incompletos. Lagunas en los datos, o posibles errores de identificación o de localización, pueden tener importantes consecuencias en la calidad de los modelos. Para poder cuantificar la incertidumbre asociada a los datos biológicos utilizamos una variante del procedimiento “10-fold cross validation”. Esta metodología consiste en segregar aleatoriamente los datos de las especies en un grupo de calibración y otro de evaluación, utilizando, concretamente, el 75% de los datos para la calibración, y el restante 25% para la evaluación. Este proceso se repite 10 veces para poder permitir una evaluación de la sensibilidad de los modelos con diferentes agrupaciones de los datos (Araújo & Guisan 2006). En el caso que nos ocupa, además de usar este método para evaluar los modelos (ver sección sobre evaluación de modelos bioclimáticos), se usó cada una de las 10 agrupaciones de datos para generar un modelo y hacer las respectivas proyecciones y, de este modo, generar las diferentes respuestas de los modelos que explican alguna variabilidad asociada a la calidad de los datos biológicos.

b) Clases de modelos: Estudios recientes demuestran que la elección del modelo bioclimático puede condicionar el diagnóstico sobre los impactos de las alteraciones climáticas en la distribución de las especies. Por ejemplo, Pearson et al. (2006) utilizaron 9 clases de modelos para estimar la distribución actual potencial y futura de un conjunto de plantas de Sudáfrica. Al analizar los resultados, los autores verificaron que una comparación entre la distribución potencial actual y futura de una de las especies daba origen, en función a los modelos bioclimáticos utilizados, a estimaciones que podían variar entre el 92% de pérdida y el 322% de aumento de la distribución potencial. Este patrón de variación entre modelos fue registrado para las restantes especies de plantas sudafricanas, así como en otros estudios realizados con plantas (Thuiller 2004), con reptiles y anfibios europeos (Araújo et al. 2006), y con aves nidificantes del Reino Unido (Araújo et al. 2005b). Para poder considerar en nuestro estudio, de forma explícita, la incertidumbre asociada al uso de las diferentes técnicas de modelización, se usaron, concretamente, 8 técnicas de modelización, a saber: “Generalized Additive models” (GAM) (Hastie and Tibshirani 1990), “Multivariate Adaptive Regression Splines” (MARS) (Friedman 1991), “Random Forests” (RF) (Breiman 2001), “Boosting Regression Trees” (BRT) (Ridgeway 1999), “Artificial Neural Networks” (ANN) (Ripley 1996), “Maximum En-

tropy” (MaxEnt) (Phillips et al. 2006; Phillips & Dudík 2008), “Genetic Algorithm for Rule Prediction” (GARP) (Stockwell & Peters 1999), y distancias de “Mahalanobis” (MAHAL) (Tsoar et al. 2007).

c) Parametrización de los modelos: Cada uno de los ocho modelos puede ser parametrizado de forma distinta y no existen reglas universales, aplicables a todas las circunstancias. Uno de los pasos del proceso de parametrización que contribuyó considerablemente a la variabilidad de las proyecciones es el procedimiento adoptado para seleccionar las variables climáticas del modelo final (para una revisión ver Araújo & Guisan 2006). Una forma de estandarizar el proceso de selección de variables y asegurar la posibilidad de comparación entre modelos sería ‘forzando’ los modelos a utilizar 3 variables seleccionadas (e.g., Fielding & Haworth 1995; Araújo & Williams 2000; Segurado & Araújo 2004). Así, hemos optado por una aproximación inspirada en los procedimientos de “multimodel inference” (Burnham & Anderson 2002), que consiste en explorar la totalidad de las combinaciones factoriales de las variables consideradas. En el caso que nos ocupa, y teniendo en cuenta que se consideraron tres variables climáticas (temperatura máxima del mes más cálido (A), temperatura mínima del mes más frío (B), y precipitación total anual (C), los modelos exploran siete combinaciones posibles de variables (i.e., A, B, C, AB, AC, BC, ABC); haciendo para cada una de estas combinaciones las correspondientes proyecciones de las distribuciones potenciales para el presente y para el futuro.

d) Climas futuros: Además de las fuentes de incertidumbre inherentes a la calidad de los datos biológicos, la clase de modelo y la combinación de variables utilizadas para parametrizar los modelos bioclimáticos, la modelización de los climas futuros contribuyó con una fuente adicional de variabilidad que debe ser considerada, de forma explícita, en los estudios de impacto climático en la biodiversidad (e.g., Beaumont et al. 2008). Por ello, usamos tres combinaciones de modelos climáticos generales (GCM, por sus siglas en inglés) y dos escenarios socioeconómicos (véase la sección 4.3 “Escenarios de emisiones” y las figuras 4, 5 y 6).

En cada combinación de las condiciones iniciales (10) x clases de modelos (8) x parametrizaciones de modelos (7) x GCM-escenarios (1+ 4 + 4 + 5=14), se obtuvo, para cada especie, una simulación de consenso con un nivel de concordancia del 50%. En otras palabras, se usó como punto de corte para definir el nivel de concordancia la mediana de la curva de probabilidades obtenida con el “ensemble” o ensamblaje de modelos (Araújo & New 2007). Estas proyecciones de consenso fueron calculadas para cada uno de los cuatro horizontes temporales (condiciones de referencia, 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) y para cada uno de los dos escenarios considerados (A2, B2). En suma, se hicieron 7840 proyecciones por especie, lo que supone, teniendo en cuenta que se modelaron 292 especies, un total de 2.289.280 proyecciones.

4.8 Transformación de probabilidades en presencias y ausencias

El “ensamblaje” de proyecciones de distribución climáti-

ca potencial de las especies fue creado basándose en los modelos que usan las presencias de las especies en el proceso de calibración (BIOCLIM, EUCLID, MAHAL), presencias y ausencias (GLM, RF), presencias y "background" de ausencias (MaxEnt) y presencias y pseudo-ausencias retiradas del "background" (GARP). En la práctica, como las ausencias son, en la mayoría de los casos, aproximaciones a la realidad, los modelos pueden clasificarse, cómodamente, como modelos de presencia y modelos de presencia-ausencia. En el primer caso, las proyecciones resultantes de los modelos reflejan distancias a un espacio multidimensional central considerado como óptimo para cada especie. Cuanto mayor sea la distancia de una cuadrícula a este punto central teórico menor será la calidad del hábitat de la cuadrícula para esa especie. En el segundo caso, dado que se usan datos de presencia y ausencia, es posible extraer una medida de la probabilidad de encontrar la especie en una cuadrícula dada, en función de la calidad del hábitat de la cuadrícula. Ambas medidas distancia al punto central teórico óptimo y probabilidades de presencia y ausencia varían entre 0 y 1. No obstante, a efectos de cartografía de los impactos climáticos en las especies y cálculo estadístico, fue necesario transformar estos valores en ausencia (0) y presencia (1), por lo que se usaron, para cada clase de modelo, los puntos de corte que son, habitualmente, utilizados en la literatura especializada. En el caso de MAHAL, se usó el valor de 0,75%. Finalmente, para GAM, MARS, Random Forest, BRT, ANN y MaxEnt, se usó el método de AUC ("area under the curve") de la curva de ROC ("Receiver Operating Characteristic") (e.g., Fielding & Bell 1997; Liu et al. 2005). En el caso de GARP, el programa calcula el punto de corte automáticamente y recurre a procedimientos de consenso independientes (Stockwell & Peters 1999).

4.9 Evaluación de los modelos bioclimáticos

En un escenario ideal, los modelos deberían ser validados recurriendo a datos independientes, por ejemplo, distribución de las especies en el pasado (Araújo et al. 2005a; Araújo & Rahbek 2006). Sin embargo, ello no ha sido posible debido a que no existe suficiente información. Por este motivo, optamos por un proceso de verificación de modelos usando la técnica "10-fold cross validation". Con esta técnica, los datos originales son divididos, de forma aleatoria, en un componente de calibración (75% de los datos) y otro de evaluación (25% de los datos), manteniéndose constante la prevalencia de los datos de calibración (i.e., la proporción de presencias y ausencias se mantiene constante en cada uno de los conjuntos de datos usados para la calibración). Este proceso fue repetido 10 veces permitiendo así evaluar la estabilidad de los modelos frente a cambios de las condiciones iniciales (i.e., datos de calibración). La verificación de los modelos se realizó recurriendo a la medida de ajuste "True Skill Statistic" (TSS), que es una versión mejorada del método de Kappa (Monserud & Leemans 1992) y que retira el efecto de la prevalencia en el cálculo de ajuste de los modelos (Fielding & Bell 1997; Allouche et al. 2006):

$$TSS=Se+Sp-1 \quad (\text{ecuación 1})$$

Siendo:

$$Se=\frac{TN}{TN+FP} \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde "Se" corresponde al índice de "sensitivity", "TN" al índice de "true negatives" (ausencias observadas, modeladas como ausencias) y "FP" al índice de "false positives" (ausencias observadas, modeladas como presencias). Y:

$$Sp=\frac{TP}{TP+FN} \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde "Sp" corresponde al índice de "specificity", "TP" al índice de "true positives" (presencias observadas, modeladas como presencias) y "FN" al índice de "false negatives" (presencias observadas, modeladas como ausencias).

Los valores de TSS varían entre -1 y 1, siendo los valores próximos a cero una indicación de que el modelo no tiene capacidad de ajustar la proyección a los datos ("skill"). Además de la medida de TSS, se calcularon medidas de ajuste alternativas, como son la "sensitivity", "specificity", "AUC", "kappa", "accuracy", y "r2" (e.g., Fielding & Bell 1997), disponibles para consulta en la web del proyecto.

4.10 Medidas de impacto climático en la biodiversidad

La evaluación de los impactos de las alteraciones climáticas sobre la biodiversidad se realizó teniendo en cuenta dos tipos de análisis. En primer lugar, se analizaron los resultados de los modelos para obtener una síntesis para cada una de las especies consideradas. Concretamente, se clasificaron las especies modeladas en especies que en el futuro "ganarán" condiciones climáticas favorables para su persistencia, especies que "perderán" condiciones climáticas favorables, y especies que mantendrán condiciones "estables" (Figura 7). El cálculo de esta medida de tendencia, (Delta), para el área potencial disponible por cada especie en el futuro fue realizado como sigue:

$$Delta=(t2_p - t1_p) * 100 / t1_p \quad (\text{ecuación 4})$$

donde Delta es la medida de la tendencia del área de distribución potencial, "t2_p" es el área ocupada por la distribución potencial de la especie en el futuro y "t1_p" es el área ocupada por la distribución potencial de la especie en el presente.

Una cuarta categoría incluiría aquellas especies cuya distribución actual observada se superpone de forma limitada con la distribución potencial futura. Un bajo nivel de solapamiento indicaría que estas especies requerirían esfuerzos importantes de dispersión para adaptarse a las alteraciones climáticas proyectadas. El cálculo de este indicador de solapamiento se obtuvo del siguiente modo:

$$Solapamiento=(t2_p \cap t1_o) * 100 / t1_o \quad (\text{ecu.5})$$

donde "t1_o" es el área ocupada por la especie en el presente.

Especies en esta categoría podrían, teóricamente, también estar incluidas en cualquiera de las categorías anteriores. Los criterios cuantitativos empleados para cla-



FIGURA 7 – CRITERIOS USADOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS ESPECIES EN DIFERENTES CATEGORÍAS EN FUNCIÓN DE SU PÉRDIDA, GANANCIA O ESTABILIDAD DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL.

sificar las especies en cada una de estas categorías se explican en la figura 7.

En segundo lugar, se analizaron los patrones de “ganancia” y “pérdida” a nivel geográfico analizando las alteraciones en la distribución potencial de las especies atendiendo a las cuadrículas UTM de 10 Km consideradas. Este análisis se basó en dos aproximaciones complementarias. La primera consiste en el análisis visual de los patrones de riqueza potencial de las especies en los diferentes períodos estudiados. La segunda se basó en el cálculo de una medida de cambio (“turnover”, T) de la composición de las especies potencialmente presentes en cada una de las cuadrículas (e.g., Thuiller et al. 2005b; Araújo et al. 2006). La medida de cambio o “turnover” fue calculada del siguiente modo:

$$T = (G+L) / (SR+G) \quad (\text{ecuación 6})$$

donde “G” representa el número de especies potencialmente “ganadas” en una cuadrícula y horizonte temporal determinados (asumiendo que las especies pueden colonizar las nuevas áreas disponibles de forma inmediata, sin ningún tipo de constreñimiento biológico o espacial), “L” representa el número de especies potencialmente “perdidas” y “SR” representa el número total de especies estimadas en las condiciones de referencia, es decir, en el tiempo presente.

4.11 Propuesta de medidas de adaptación

El número de medidas de adaptación para asegurar la persistencia de las especies, en un contexto de alteraciones climáticas, puede ser muy elevado. El hecho de que las

alteraciones climáticas no operen de forma aislada sino que interactúen con otros factores de amenaza actuales conlleva gran dificultad. Una propuesta detallada de las medidas de adaptación para cada especie implicaría la ponderación de factores relacionados como su autoecología, su estado de amenaza en la globalidad de su área de distribución y los mecanismos de amenaza que operan al nivel de las poblaciones ibéricas en el presente y en el futuro. Este nivel de detalle sobrepasa claramente el objetivo de este estudio, por lo que se optó por realizar una síntesis de las potenciales medidas de adaptación basándonos en los impactos estimados con los modelos realizados (ver criterios de asignación de medidas en la tabla 2). Las medidas propuestas son genéricas y se pueden organizar en las siguientes categorías:

Grupo a) Protección jurídica de taxones y/o su hábitat, a través de la inclusión o modificación de categoría en los instrumentos legales disponibles, tales como catálogos de especies o catálogos de hábitat amenazados. Se podrían denominar como medidas dirigidas a las especies. Implicarían, en primer lugar, la revisión del estado de amenaza de las especies en base a criterios que incluyan los efectos directos e indirectos de las alteraciones climáticas. Actualmente, las categorías UICN empleadas en los Libros Rojos de vertebrados terrestres de España no consideran como criterio de amenaza específico la exposición a las alteraciones climáticas. La creación de una “lista naranja” (especies no amenazadas actualmente, pero que podrán llegar a estarlo fruto de las alteraciones climáticas) o la actualización de los criterios UICN (e.g., Akçakaya et al. 2006; Brook et al. 2009), incluyendo los mecanismos de amenaza derivados de las alteraciones climáticas, pudiera ser necesario. Finalmente, todo ello debería posteriormente ser integrado en los catálogos, listados y demás instrumentos legales para la protección de las especies, ya sea incluyéndolas en los mismos o reclasificándolas en función de las categorías existentes. Es importante también considerar como medida de adaptación la protección jurídica de los tipos de hábitat, a través de catálogos o similares, en los que están presentes las distintas especies. De estos instrumentos para la protección de especies y hábitat, a su vez, derivan los Planes de Conservación y Recuperación.

Grupo b) Conservación in situ de los taxones y de su medio natural, donde se incluirían:

- B1. Designación de nuevos espacios protegidos o modificación de los existentes, incluyendo la elaboración o modificación de planes de gestión para su conservación. Se estima que los actuales espacios naturales protegidos (en España, redes de áreas protegi-

Categoría	Medidas de adaptación
ESTABLE	No requiere medidas de adaptación.
GANA	No requiere medidas de adaptación.
PIERDE	Medidas de adaptación de los grupos a) y b). Si la pérdida es mayor del 70% de la distribución climática potencial original, se debe considerar la posibilidad de aplicar también medidas del grupo c).
DESPLAZAMIENTO	Medidas contempladas en b3

TABLA 2 – MEDIDAS DE ADAPTACIÓN RECOMENDADAS EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DE IMPACTO ESTIMADA EN EL APARTADO 4.10.

das por las comunidades autónomas, Red Natura 2000, etc.) serán insuficientes para preservar las especies que contienen (Hannah et al. 2007; Araújo 2009b). En algunos casos, será posible favorecer la adaptación de las especies a las alteraciones climáticas a través de la ampliación de los espacios protegidos existentes; en otros casos, será necesario designar nuevas áreas de conservación en lugares actualmente sin ninguna figura de protección (Williams et al. 2005; Phillips et al. 2008; Araújo 2009a).

- B2. Acciones específicas para poblaciones y su hábitat, incorporadas en los respectivos planes de conservación o gestión de las especies amenazadas. Englobaría todo tipo de acciones concretas contenidas en los planes de gestión, conservación, recuperación o manejo, así como en estrategias de conservación que afecten a especies, poblaciones o sus hábitats que estén amenazados por las alteraciones climáticas. Actualmente, estos planes no suelen considerar estas amenazas, por lo que en la mayoría de los casos sería necesario actualizarlos, así como tener en cuenta este problema en la elaboración de nuevos planes y estrategias que contemplen este tipo de acciones. Es importante recordar que fruto de la elevada incertidumbre asociada a las proyecciones sobre el efecto del cambio climático en la biodiversidad, sería conveniente considerar modelos de gestión flexibles (“adaptive management”), dado que permiten una constante revisión de objetivos y metodologías para alcanzar las metas de conservación deseadas (e.g., Tompkins & Adger 2004; Barron et al. 2009; Lawler et al. 2009).

- B3. Acciones para favorecer la conectividad y permeabilidad del territorio, incluyendo la creación de corredores ecológicos para la dispersión. La conservación en espacios naturales protegidos puede revelarse insuficiente, especialmente cuando la adaptación de las especies a las alteraciones climáticas requiere elevada movilidad. En

estos casos, es necesario generar estrategias de gestión del territorio (“off-protected areas management”) (Araújo 2009b) que faciliten la migración de especies en el territorio, en especial entre espacios naturales protegidos (Campbell et al. 2008; Heller & Zavaleta 2009).

- B4. Restauración de los ecosistemas que constituyen el hábitat de las especies. La restauración podría considerarse como parte de la medida b1 si se lleva a cabo en un espacio protegido. Considerada en todo el territorio, esta medida puede resultar muy relevante porque potencialmente podría poner a disposición de las especies amenazadas por el cambio climático áreas anteriormente no disponibles (por ejemplo, degradadas) donde concurren los requerimientos climáticos necesarios para esas especies, habida cuenta de que otras zonas antes adecuadas pueden haber dejado de ser parte del área de distribución natural por el cambio en el clima.

- B5. Introducción, reintroducción y traslocación de taxones amenazados. En caso de tratarse de especies que cuenten con planes o estrategias de conservación, esta medida podría incluirse dentro del apartado b2. Se trata de medidas de manejo que tendrían como objetivo reforzar o ubicar en lugares adecuados –en cuanto a clima y hábitat– poblaciones de especies “desplazadas” por el cambio climático.

Grupo c) Conservación ex situ, fundamentalmente a través de la conservación en bancos de germoplasma y la cría en cautividad. En casos extremos, en los que ninguna de las medidas de adaptación consideradas anteriormente sea suficiente para garantizar la persistencia de las especies, será necesario considerar medidas de conservación ex situ; en otras palabras, medidas que promuevan la reproducción en cautiverio y/o la conservación de germoplasma de las especies amenazadas, de modo que pueda al menos garantizarse la futura reintroducción en lugares adecuados (e.g., Hogbin & Peakall 1999).