



IMPACTOS, VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN  
AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA BIODIVERSIDAD  
ESPAÑOLA  
2. FAUNA DE VERTEBRADOS

Proyecciones de las áreas de distribución potencial  
de la fauna de vertebrados de la España peninsular  
por efecto del cambio climático

AUTORES

**MIGUEL B. ARAÚJO**  
Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC

**FRANÇOIS GUILHAUMON**  
Universidad de Évora

**DORA RODRIGUES NETO**  
Universidad de Évora

**ISAAC POZO ORTEGO**  
Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC

**RICARDO GÓMEZ CALMAESTRA**  
Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, MARM

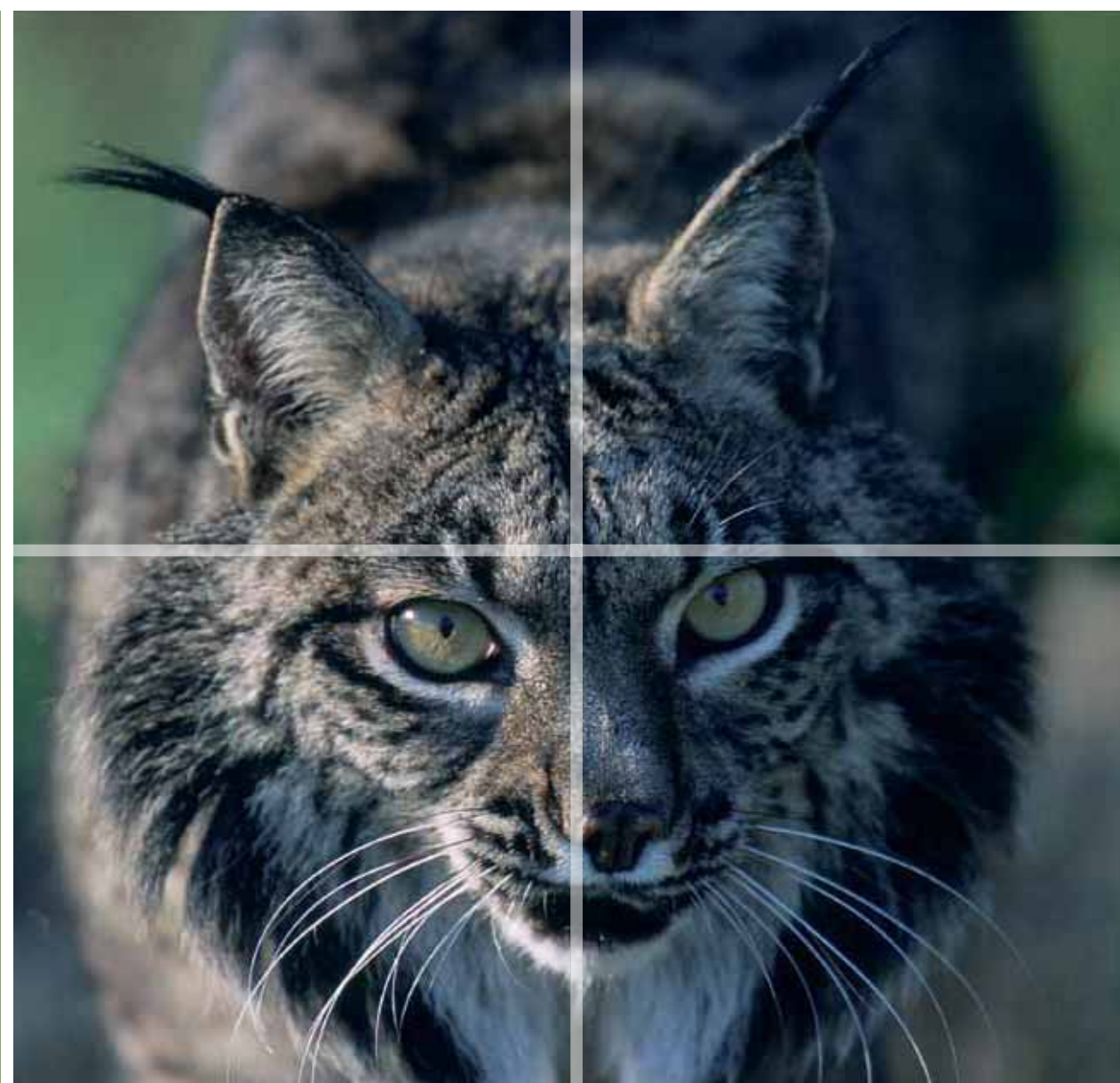
DIRECCIÓN TÉCNICA

**RICARDO GÓMEZ CALMAESTRA**  
Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, MARM

**JOSÉ RAMÓN PICATOSTE**  
Oficina Española de Cambio Climático, MARM

**ALFONSO GUTIÉRREZ TEIRA**  
Oficina Española de Cambio Climático, MARM

**ERNESTO R. CAMINO**  
Agencia Estatal de Meteorología, MARM







# IMPACTOS, VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA BIODIVERSIDAD ESPAÑOLA

## 2. FAUNA DE VERTEBRADOS

Proyecciones de las áreas de distribución potencial de la fauna  
de vertebrados de la España peninsular por efecto del cambio  
climático

PLAN NACIONAL DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO  
INVENTARIO NACIONAL DE BIODIVERSIDAD

### AUTORES:

**MIGUEL B. ARAÚJO**

Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC

**FRANÇOIS GUILHAUMON**

Universidad de Évora

**DORA RODRIGUES NETO**

Universidad de Évora

**ISAAC POZO ORTEGO**

Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC

**RICARDO GÓMEZ CALMAESTRA**

Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, MARM

### DIRECCIÓN TÉCNICA:

**RICARDO GÓMEZ CALMAESTRA**

Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, MARM

**JOSÉ RAMÓN PICATOSTE**

Oficina Española de Cambio Climático, MARM

**ALFONSO GUTIÉRREZ TEIRA**

Oficina Española de Cambio Climático, MARM

**ERNESTO R. CAMINO**

Agencia Estatal de Meteorología, MARM



Primera edición, 2011

Este libro se acoge a una licencia Creative Commons Attribution - Share Alike 3.0 Unported (Reconocimiento - Compartir Igual). Se permite copiar y distribuir el trabajo original y realizar trabajos derivados con las condiciones de citar este trabajo en la forma que figura a continuación y distribuir cualquier trabajo derivado de este bajo una licencia igual, equivalente o compatible.

A efectos bibliográficos, este trabajo debe citarse como sigue:

Araújo, M.B., Guilhaumon F., Neto D. R., Pozo, I., & Calmaestra R. (2011) Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático de la Biodiversidad Española. 2 Fauna de Vertebrados. Dirección general de medio Natural y Política Forestal. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Madrid, 640 páginas.

El proyecto ha sido financiado por la Subdirección General de Biodiversidad, Dirección General de Medio Natural y Política Forestal (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino). Las opiniones que se expresan en esta obra son responsabilidad de los autores y no necesariamente del MARM o de su personal.

Existe una versión digital del texto con instrucciones de acceso a los datos del proyecto en la dirección

<http://www.ibiochange.mncn.csic.es/atlascc/>

y en la web del Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, <http://marm.es>

Créditos

Fotografía de portada: CENAM-OAPN-MARM José Manuel Reyero

Diseño: Ricardo Curtis (Zona Impresa S.L.)

NIPO: 770-11-371-4

# Índice

<b>1. Presentación</b> .....	<b>11</b>
<b>2. Resumen</b> .....	<b>13</b>
<b>3. Introducción, Objetivos y Ámbito del Trabajo</b> .....	<b>15</b>
3.1 Introducción .....	15
3.2 Objetivos .....	16
3.3 Ámbito de trabajo .....	16
<b>4. Datos y Metodología</b> .....	<b>17</b>
4.1 Datos Biológicos .....	17
4.2 Datos del clima actual .....	20
4.3 Escenarios de emisiones .....	20
4.4 Horizontes temporales .....	21
4.5 Proceso de los datos climáticos futuros .....	21
4.6 Corrección del error sistemático en las proyecciones .....	22
4.7 Calibración de los modelos bioclimáticos .....	22
4.8 Transformación de probabilidades en presencias y ausencias .....	23
4.9 Evaluación de los modelos bioclimáticos .....	24
4.10 Medidas de impacto climático en la biodiversidad .....	24
4.11 Propuesta de medidas de adaptación .....	25
<b>5. Alteraciones en la distribución potencial de las especies</b> .....	<b>28</b>
5.1 Análisis por especies .....	29
5.2 Ajustes y posibles errores de los modelos .....	622
5.3 Análisis por grupos taxonómicos .....	628
5.4 Patrones geográficos de la riqueza .....	628
<b>6. Conclusiones e implicaciones para la conservación</b> .....	<b>629</b>
6.1 Limitaciones de los modelos .....	629
6.2 Implicaciones para la conservación en España .....	630
6.3 Líneas de investigación futuras .....	631
6.4 Integración de las medidas de adaptación en los instrumentos para la conservación en España .....	631
<b>Bibliografía</b> .....	<b>636</b>
<b>Índice de especies</b> .....	<b>638</b>



## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> – Riqueza de anfibios, reptiles, mamíferos y aves en el sistema de cuadrículas UTM de 10x10 km.....	17
<b>Figura 2</b> – Datos climáticos. A la izquierda, evolución del número de estaciones meteorológicas disponibles entre 1950 y 2000; en rojo, estaciones pluviométricas; en azul, estaciones termométricas.....	20
<b>Figura 3</b> – Datos climáticos interpolados, basados en las estaciones meteorológicas.....	20
<b>Figura 4</b> – Temperatura máxima del mes más cálido (°C) en los periodos de referencia.....	21
<b>Figura 5</b> – Temperatura mínima del mes más frío (°C) en los periodos de referencia.....	21
<b>Figura 6</b> – Precipitación anual total (mm) en los periodos de referencia.....	21
<b>Figura 7</b> – Criterios usados para la clasificación de las especies en diferentes categorías en función de su pérdida, ganancia o estabilidad de distribución potencial.....	25
<b>Figura 8</b> – Riqueza observada y potencial actual de especies.....	622
<b>Figura 9</b> – Distribución de la riqueza potencial conjunta de las especies de anfibios en tres periodos, para dos escenarios y bajo tres modelos generales de clima.....	624
<b>Figura 10</b> – Distribución de la riqueza potencial conjunta de las especies de reptiles en tres periodos, para dos escenarios y bajo tres modelos generales de clima.....	625
<b>Figura 11</b> – Distribución de la riqueza potencial conjunta de las especies de aves en tres periodos, para dos escenarios y bajo tres modelos generales de clima.....	626
<b>Figura 12</b> – Distribución de la riqueza potencial conjunta de las especies de mamíferos en tres periodos, para dos escenarios y bajo tres modelos generales de clima.....	627
<b>Figura 13</b> – Cambio en la composición de las especies (“turnover”).....	628
<b>Figura 14</b> – Elementos de la Ley 42/2007, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, relevantes para integrar medidas de adaptación al cambio climático.....	632

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> – Especies modelizadas en el estudio.....	18
<b>Tabla 2</b> – Medidas de adaptación recomendadas en función de la categoría de impacto estimada en el apartado 4.10.....	26
<b>Tabla 3</b> – Porcentaje de cambio del área de distribución de las especies (ecuación 4) en cuartiles distintos de la curva de frecuencia de los valores estimados bajo los escenarios y horizontes temporales considerados.....	623
<b>Tabla 4</b> – Porcentaje de las especies con un solapamiento entre la distribución actual observada y la distribución potencial menor de un 70%.....	623
<b>Tabla 5</b> – Porcentaje de especies que requieren medidas de adaptación.....	630



Las fotografías e ilustraciones obtenidas en este estudio fueron amablemente cedidas por las entidades y personas que se listan a continuación.

Albins (*Regulus regulus*). ARDEIDAS. Fernando Cámara Orgaz (*Aquila adalberti*; *Canis lupus*; *Capreolus capreolus*; *Cervus elaphus*; *Corvus corone*; *Corvus frugilegus*; *Delichon urbica*; *Dendrocopos major*; *Elanus caeruleus*; *Felis silvestris*; *Hieraetus fasciatus*; *Hieraetus pennatus*; *Milvus milvus*; *Oriolus oriolus*). ARDEIDAS. José Luis de la Cruz Alemán (*Apodemus flavicollis*; *Caprimulgus ruficollis*; *Emberiza cirulus*; *Otus scops*; *Riparia riparia*). ARDEIDAS. Miguel Ángel de la Cruz Alemán (*Columba oenas*; *Mus musculus*; *Mustela nivalis*; *Oryctolagus cuniculus*; *Ovies aries*; *Picus viridis*; *Streptopelia turtur*; *Tetrax tetrax*). ARDEIDAS. Vicente García Torrejón (*Asio flammeus*). Paulo Barros (*Alytes cisternasii*; *Discoglossus galganoi*; *Microtus agrestis*; *Pleurodeles waltii*; *Talpa occidentalis*). Bogbumper (*Apus pallidus*). César Capinha (*Anthus trivialis*; *Dama dama*; *Hyla arborea*; *Hirundo daurica*; *Lacerta lepida*; *Pelobates cultripes*; *Rana perezi*). CENEAM-OAPN-MARM. Javier Ara Cajal (*Arvicola sapidus*; *Emberiza citrinella*; *Euproctus asper*; *Gypaetus barbatus*; *Hierophis viridiflavus*; *Lagopus mutus*; *Marmota marmota*; *Montifringilla nivalis*; *Mustela erminea*; *Parus palustris*; *Pyrrhula pyrrhula*; *Rupicapra pyrenaica*). CENEAM-OAPN-MARM. Oriol Alamany (*Turdus torquatus*). CENEAM-OAPN-MARM. Fernando Cámara Orgaz (*Ciconia nigra*; *Martes foina*; *Mustela putorius*; *Perdix perdix*; *Scolopax rusticola*; *Tyto alba*). CENEAM-OAPN-MARM. Antonio Camoyán (*Caprimulgus europaeus*; *Crociodura russula*). CENEAM-OAPN-MARM. José Luis de la Cruz Alemán (*Aquila chrysaetos*; *Lacerta schreiberi*; *Lepus granatensis*). CENEAM-OAPN-MARM. Vicente García Canseco (*Aegyptius monachus*; *Meles meles*). CENEAM-OAPN-MARM. José Luis Perea (*Atelerix algirus*; *Talpa europea*). CENEAM-OAPN-MARM. José Manuel Reyero (*Lynx pardinus*). CENEAM-OAPN-MARM. José Luis Rodríguez (*Chionomys nivalis*; *Monticola saxatilis*; *Suncus etruscus*). CENEAM-OA PN-MARM. Carlos Sánchez Alonso (*Dryocopus martius*; *Microtus arvalis*; *Prunella collaris*). CENEAM-OAPN-MARM. Gregorio Torres Molinero (*Herpestes ichneumon*). CENEAM-OAPN-MARM. Julián Vinuesa (*Rattus rattus*). CENEAM-OAPN-MARM. Eduardo Viñuales (*Iberolacerta bonnali*). Jorge Falagán Fernández (*Tichodroma muraria*). Mario García París (*Acanthodactylus erythrurus*; *Algyroides marchi*; *Alytes dickhilleni*; *Anguis fragilis*; *Chalcides bedriagai*; *Chalcides striatus*; *Chioglossa lusitanica*; *Coronella austriaca*; *Coronella girondica*; *Discoglossus jeanneae*; *Discoglossus pictus*; *Hemidactylus turcicus*; *Hyla meridionalis*; *Lacerta bilineata*; *Lacerta vivipara*; *Macroprotodon brevis*; *Pelodytes ibericus*; *Podarcis bocagei*; *Podarcis hispanica*; *Podarcis muralis*; *Psammotromus hispanicus*; *Rana dalmatina*; *Rhinechis scalaris*; *Tarentola mauritanica*; *Testudo graeca*; *Vipera aspis*; *Vipera latasti*; *Vipera seoanei*). Jorge Gomes (*Falco peregrinus*). Jorge Gomes/Arquivo fotográfico do Parque Biológico de Gaia-Portugal (*Sus scrofa*). Ángel Gómez (*Aegolius funereus*; *Apodemus sylvaticus*; *Circus cyaneus*; *Lynx torquilla*; *Sturnus vulgaris*; *Tachymarptis melba*). Ricardo Gómez Calmaestra (*Aegithalos caudatus*; *Alauda arvensis*; *Anthus spinoletta*; *Bucanetes githagineus*; *Burhinus oedecnemus*; *Buteo buteo*; *Calandrella brachydactyla*; *Calandrella rufescens*; *Carduelis cannabina*; *Carduelis carduelis*; *Carduelis chloris*; *Certhia brachydactyla*; *Cettia cetti*; *Cisticola juncidis*; *Clamator glandarius*; *Columba palumbus*; *Coracias garrulus*; *Corvus corax*; *Dendrocopos minor*; *Emberiza calandra*; *Emberiza hortulana*; *Falco tinnunculus*; *Galerida theklae*; *Hippolais polyglotta*; *Hirundo*

*rustica*; *Lanius collurio*; *Lanius meridionalis*; *Lanius senator*; *Lullula arborea*; *Luscinia megarhynchos*; *Melanocorypha calandra*; *Milvus migrans*; *Monticola solitarius*; *Motacilla cinerea*; *Motacilla flava*; *Muscicapa striata*; *Oenanthe hispanica*; *Oenanthe leucura*; *Oenanthe oenanthe*; *Passer domesticus*; *Passer montanus*; *Petronia petronia*; *Phoenicurus phoenicurus*; *Phylloscopus bonelli*; *Phylloscopus collybita/P.ibericus*; *Pica pica*; *Ptyonoprogne rupestris*; *Remiz pendulinus*; *Saxicola rubetra*; *Serinus citrinella*; *Serinus serinus*; *Sitta europea*; *Streptopelia decaocto*; *Sturnus unicolor*; *Sylvia atricapilla*; *Sylvia borin*; *Sylvia cantillans*; *Sylvia communis*; *Sylvia conspicillata*; *Sylvia melanocephala*; *Troglodytes troglodytes*; *Turdus philomelos*; *Turdus viscivorus*). Antonio José González López (*Microtus duodecimcostatus*). Ignasi Torre (*Glis glis*). Hans-Jörg Hellwing (*Lepus europaeus*). Evan James Hymo (*Myodes glareolus*). Ian (*Rana pyrenaica*). Andrew Ives (*Mustela lutreola*). Jeroen van der Kooij (*Neomys fodiens*). Dani Kropivnik (*Martes martes*). Pawel Kuzniar (*Certhia familiaris*). José Antonio Lapeña Sarrias (*Corvus monedula*; *Pernis apivorus*; *Pterocles orientalis*; *Regulus ignicapilla*; *Tetrao urogallus*). Llez (*Micromys minutus*). Diego Llusia (*Bufo bufo*; *Bufo calamita*; *Blanus cinereus*; *Erinaceus europaeus*; *Lissotriton helveticus*; *Mesotriton alpestris*). Mario M. (*Circaetus gallicus*). Eduardo Marabuto (*Hemorrohis hippocrepis*; *Iberolacerta monticola*; *Podarcis carbonelli*; *Triturus pygmaeus*). Francis Martín (*Accipiter nisus*; *Garrulus glandarius*; *Sylvia undata*). Jorge Martínez Huelves (*Sorex granarius*). Klara Matusevich (*Hippolais pallida*). Javier Milla (*Alcedo atthis*; *Apus apus*; *Athene noctua*; *Bubo bubo*; *Bubulcus ibis*; *Capra pyrenaica*; *Carduelis spinus*; *Cercotrichas galactotes*; *Chamaeleo chamaeleon*; *Circus pygargus*; *Coccothraustes coccothraustes*; *Cyanopica cyana*; *Eliomys quercinus*; *Emberiza cia*; *Erithacus rubecula*; *Falco naumanni*; *Ficedula hypoleuca*; *Fringilla coelebs*; *Galerida cristata*; *Loxia curvirostra*; *Luscinia svecica*; *Merops apiaster*; *Motacilla alba*; *Parus ater*; *Parus cristatus*; *Parus major*; *Passer hispaniolensis*; *Phoenicurus ochurus*; *Prunella modularis*; *Pterocles alchata*; *Pyrrhocorax pyrrhocorax*; *Saxicola torquata*; *Sciuirus vulgaris*; *Turdus merula*; *Upupa epops*; *Vulpes vulpes*). UTAD. Aurora Monzón (*Mus spretus*). Jorge Nix (*Lepus castroviejoi*). Carlos Palacín (*Alectoris rufa*; *Anthus campestris*; *Coturnix coturnix*; *Chersophilus duponti*; *Falco subbuteo*; *Otis tarda*). David Pérez (*Galemys pyrenaicus*; *Neomys anomalus*). Mario Javier Perianes Carrasco (*Gyps fulvus*; *Lutra lutra*; *Parus caeruleus*; *Vanellus vanellus*). Polande (*Sorex minutus*). Carlos Ponce (*Sylvia hortensis*). Manuel R. (*Sorex araneus*). Felix Reimann (*Zamenis longissimus*). Sebastian Ritter (*Crociodura suaveolens*). Robensteiner (*Arvicola terrestris*). Fernando Romão (*Cuculus canorus*; *Genetta genetta*; *Lissotriton boscai*; *Malpolon monspessulanus*; *Microtus lusitanicus*; *Pelodytes punctatus*; *Psammotromus algirus*; *Pyrrhocorax graculus*; *Rana iberica*; *Rana temporaria*; *Salamandra salamandra*; *Strix aluco*; *Triturus marmoratus*). Salix (*Rattus norvegicus*). David Sánchez Fernández (*Asio otus*). Suna Schleiss Thomsen (*Ursus arctos*). Marek Szczepanek (*Dendrocopos medius*). João L. Teixeira. Arquivo fotográfico do Parque Biológico de Gaia-Portugal (*Alytes obstetricans*). Thermos (*Accipiter gentilis*). Hélia Vale-Gonçalves (*Microtus cabrerae*). Sara Varela (*Ciconia ciconia*). Sara Varela. GREFA (*Neophron percnopterus*). Rollin Verlinde (*Sorex coronatus*). Waxbill (*Apus caffer*).

## Agradecimientos

Varias fueron las personas que contribuyeron, directa o indirectamente, para la realización de este proyecto. Debemos agradecer, en particular, a Ángel Felicísimo y Carlos Villaba (por el procesamiento de los datos climáticos actuales), Margarita del Dedo Garcimartín por el apoyo técnico y de gestión de la base de datos fotográfica del proyecto, María Triviño (por la gestión de las bases de datos biológicas en la fase inicial del proyecto), Alexandre Diniz Filho e Thiago Rangel (por la colaboración en el proyecto BIOIMPACTO, que fue el origen de la producción del software BIOENSEMBLES usado para modelar las distribuciones de las especies), Alejandro Rozenfeld (por la programación de BIO-GIS, usado para hacer algunos de los mapas que se presentan).

Igualmente debemos agradecer al Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino y en particular a la Dirección General de Medio Natural y Política Forestal por la información biológica y la cartografía aportadas, así como por la financiación. Así mismo a la Oficina Española de Cambio Climático y a la Agencia Española de Meteorología por el apoyo y los datos aportados para este proyecto.

También agradecer al Instituto para a Conservação da Natureza e Biodiversidade, la Unidad Biogeográfica de Alentejo de la Universidad de Évora y al Instituto de Meteorología portugués por la información climática y de distribución de especies aportada.



# 1. Presentación

**D**e acuerdo con el IV Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) El cambio climático es 'inequívoco', y de atribución 'muy probable al aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero antropógeno'. El mismo informe relaciona el calentamiento de los tres últimos decenios con los cambios observados a escala mundial en numerosos sistemas físicos y biológicos. No cabe duda de que tal afección se prolongará en el futuro.

La evaluación preliminar realizada en España por este Ministerio en 2005 dejó constancia de que los efectos del cambio climático sobre el rico patrimonio natural que alberga nuestro país son ya evidentes. Afectan a múltiples aspectos de nuestra biodiversidad, como son los cambios en la distribución de los pisos de vegetación o las alteraciones en determinados parámetros fenológicos de las especies (como la brotación, floración y caída de la hoja). Los modelos proyectan unas condiciones climáticas que, a lo largo del siglo XXI, sin duda van a suponer un factor de presión adicional para nuestra biodiversidad. Es esperable que esta presión añadida incremente las cifras -ya actualmente elevadas- de especies amenazadas en España.

Resulta, por tanto, prioritario profundizar en el conocimiento de los impactos y la vulnerabilidad al cambio climático de la biodiversidad española, de manera que nos permita diseñar e integrar medidas de adaptación en las políticas de planificación y gestión de la biodiversidad y adelantar, en la medida de lo posible, las acciones necesarias para su conservación en un mundo de clima cambiante. No obstante, hemos de ser conscientes de que el éxito de las posibles medidas de adaptación estará finalmente condicionado a que las causas que alteran el clima sean corregidas.

El Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC), aprobado por el Consejo de Ministros en octubre de 2006, tiene como objetivo la integración de los resultados de las evaluaciones de impacto, vulnerabilidad y adaptación en la planificación y gestión de los sistemas ecológicos y los sectores socioeconómicos españoles. La biodiversidad y los bienes y servicios que aporta se han considerado y tratado, desde su aprobación, como un recurso de acción prioritaria, por su vital importancia intrínseca y su influencia en el buen estado de otros recursos y sectores.

La publicación que aquí presento es el principal resultado de un ambicioso proyecto -elaborado en el ámbito del PNACC- que ha abordado la evaluación de los posibles impactos del cambio climático sobre algunos de los componentes más significativos de la biodiversidad de España. Pretende sentar unas bases sólidas que permitan poner en marcha las actuaciones preventivas necesarias para aumentar la capacidad de adaptación de nuestra biodiversidad. El proyecto ha sido

una iniciativa coordinada entre dos direcciones generales del MARM: la Oficina Española de Cambio Climático y la Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, con apoyo de la Agencia Estatal de Meteorología. Se han desarrollado dos proyectos idénticos en sus planteamientos, pero llevados a cabo por dos equipos de investigación distintos que han ajustado sus métodos de análisis a las particularidades de la fauna y la flora, respectivamente.

En su conjunto, el trabajo analiza los posibles efectos del cambio climático sobre los principales componentes vegetales de nuestros paisajes, sobre los taxones de flora más amenazados y sobre un amplio conjunto de nuestra fauna de vertebrados.

Este trabajo se ha realizado con el mejor conocimiento disponible sobre las proyecciones climáticas para el siglo XXI y sobre la distribución actual de las especies consideradas, y por tanto, tiene un indudable valor estratégico en el momento actual, en que se están desarrollando los instrumentos para la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad en España en las próximas décadas. Más que resultados cerrados, lo que este estudio proporciona son nuevas herramientas de trabajo, pues cada especie requiere un minucioso trabajo adicional de análisis, interpretación e integración en el conjunto de conocimientos sobre ella y sus políticas de conservación.

Los resultados aquí presentados no deben interpretarse como augurios de lo que va a suceder; no predicen, sino que proyectan situaciones futuras bajo unas premisas particulares sobre el clima y la dependencia y respuesta de las especies ante sus cambios. Para cada especie, las proyecciones pueden diferir notablemente entre modelos, lo que obliga a trabajar con altas dosis de incertidumbre.

Los modelos empleados permiten una afinación y realimentación permanente, a medida que mejoren el conocimiento de base sobre las especies y el clima, sobre los modelos de clima global y las técnicas de regionalización, o a medida que aumenten las certidumbres sobre los techos y horizontes de mitigación de los gases de efecto invernadero, en un eventual acuerdo en el seno de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

Por todo ello, el MARM ha decidido poner a disposición de cualquier institución dedicada a la investigación, la conservación, la gestión o el seguimiento de la biodiversidad no sólo estos Atlas, sino toda la información y las bases de datos generadas en el proyecto, aprovechando las vías que permite la tecnología actual (SIG, Internet, etc.), para facilitar que cualquier interesado pueda acceder a los mismos, en el esfuerzo común que debe guiarnos para afrontar el reto de conservar la biodiversidad.

**ROSA AGUILAR RIVERO**

Ministra de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España



## 2. Resumen

España continental encierra, aproximadamente, un 50% de la biodiversidad Europea. Una parte de esta biodiversidad está actualmente amenazada por diversas causas, donde la principal es la modificación de los hábitats naturales y seminaturales. El cambio climático es una grave amenaza cuyos impactos ya afectan a nuestra biodiversidad, y lo harán de manera más importante en el futuro. ¿Sería posible anticipar y mitigar tales impactos? El proyecto IMPACTOS, VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA BIODIVERSIDAD EN ESPAÑA, promovido por el Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, pretende investigar los posibles impactos del cambio climático sobre nuestra biodiversidad durante el siglo XXI. El proyecto ha abordado la flora vascular y la fauna de vertebrados por separado. En este volumen se presentan los resultados obtenidos para esta última.

Se modelizaron las distribuciones potenciales actuales y futuras para una amplia representación de los vertebrados terrestres españoles (incluyendo anfibios, reptiles, mamíferos y aves), y se identificaron potenciales medidas de adaptación, genéricas, que podrían minimizar esta problemática en el futuro. Para ello, se han generado más de dos millones de modelos bajo dos escenarios de emisión (A2 y B2) y bajo diferentes escenarios climáticos regionales (CGCM2, ECHAM4 y HADAM3h). La variabilidad en las proyecciones de la distribución potencial futura es alta, indicando que existen elevados niveles de incertidumbre. A pesar de la variabilidad de las proyecciones se documentó una fuerte tendencia de contracción de la distribución potencial desde el Sudoeste o Sur de España al Noreste o Norte para casi todas las especies estudiadas. La magnitud de las contracciones varía entre especies, pero es generalmente alta para la mayoría (es decir, contracciones superiores al 30% de la distribución actual). Consecuentemente, se han proyectado áreas de alto cambio en la composición potencial de especies o "turnover". El solapamiento entre las distribuciones actuales observadas y las potenciales futuras resultó también variable. En el escenario A2, para el 70-80% de las especies, la distribución observada actual y futura se solapará menos del 70%. Según nuestro análisis, utilizando el modelo ECHAM A2 para el 2041-2070, el 71% de las especies estudiadas son candidatas a medidas de adaptación específicas para compensar los impactos del cambio climático. La totalidad de estas especies podrían requerir protección legal, selección de nuevos espacios para conservación in situ y desarrollo de planes de gestión específicos, el 71% podría requerir creación de corredores de dispersión entre espacios bien conservados, y el 51% podría requerir medidas de conservación ex situ.

El trabajo reconoce la existencia de limitaciones que pueden condicionar la interpretación y alcance de sus resultados, pero, en cualquier caso, presenta importantes implicaciones para la conservación futura de la biodiversidad. Una cuestión muy relevante es la necesaria integración de las medidas de adaptación en los instrumentos existentes en el actual marco normativo de la conservación en España, en aplicación del necesario enfoque preventivo.

## Summary

Continental Spain holds approximately 50% of the European biodiversity. Some of this biodiversity is now threatened by several factors, namely habitat modification. Climate change poses additional threats with impacts being already observed and more impacts being projected in the future. Can such impacts be anticipated and mitigated? The project "EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS, VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA FAUNA EN ESPAÑA" is promoted by the Spanish "Subdirección General de Biodiversidad" of the "Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino," with the aim of investigating the possible future impacts of climate change on continental's Spain biodiversity over the 21st century. The project has addressed analysis of impacts for vascular plants and animals separately. In the current volume results are presented for the fauna.

Current and future potential distributions were modelled for a wide range of terrestrial vertebrates in Spain, including amphibians, reptiles, mammals, and birds. General adaptation measures were also proposed to minimise impacts of climate change on these species. More than 2 million models were generated under two emission scenarios (A2 and B2) and a range of regional climate models (CGCM2, ECHAM4, and HADAM3h). Projections of altered species potential distributions were highly variable, indicating that uncertainties exist. Despite variability across projections, a robust tendency of contraction of species potential distributions from the southwest or south of Spain to the northeast or north was recorded for nearly all species studied. The magnitude of the contractions varied across species but they were generally high for most of them (i.e., contractions >30% of the current range). Consequently, high turnover (i.e., change in the potential composition of species) was projected. The degree of overlap between current observed distributions and future potential distributions was also variable. With the scenario A2, 70-80% of the species' observed distributions overlapped with future potential ones in less than 70%. According to our analysis, using the model ECHAM4 A2 for 2041-2070, 71% of the species studied are candidate to specific adaptation measures to compensate for climate change impacts. All of these species might require legal protection, 71% might require the establishment of dispersal corridors between conservation sites, and 51% might require ex-situ conservation measures.

Shortcomings of the models are acknowledged as well as their consequences for the interpretation of the results. Nevertheless, the conservation implications of this study are clear. Of particular relevance is the need for inclusion of adaptation measures in existing regulatory instruments for biodiversity conservation in Spain, so to ensure that preventive measures are accounted for.



## Introducción, Objetivos y Ámbito del Trabajo

### 3.1 Introducción

España peninsular posee aproximadamente el 50% de las especies de la fauna y la flora europeas (Williams et al. 2000). Gran parte de estas especies están presentes exclusivamente en España, es decir, son endémicas. Las razones que contribuyen a explicar esta enorme riqueza natural incluyen la ubicación del territorio español, los eventos paleogeográficos y paleoclimáticos del pasado, -con sucesivos aislamientos y contactos con placas continentales contiguas y refugio de fauna y flora durante periodos glaciales e interglaciales-, y, ya en tiempos históricos, unos usos del territorio que han afectado menos negativamente a la biodiversidad que en otros países europeos.

La singularidad y riqueza de la biodiversidad española está bien representada por su fauna, y en particular por sus vertebrados terrestres. El conocimiento disponible actualmente para ellos, en materia de demografía, distribución y estado de conservación a escala estatal es, en general, satisfactorio. Ello es, en buena parte, fruto del trabajo realizado durante la década 2000-2010 para su inventariación y seguimiento. Así, disponemos actualmente de Atlas y Libros Rojos para peces continentales, anfibios y reptiles, mamíferos y aves reproductoras, elaborados por los expertos y asociaciones científicas más relevantes en España para cada grupo. Estos trabajos, promovidos por el Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, nos han permitido disponer de la distribución de los vertebrados en España, y, al tiempo, nos han mostrado el panorama de su estado de conservación a escala nacional.

Los Atlas y Libros Rojos elaborados en esta década pasada (Doadrio 2001; Palomo & Gisbert 2002; Martí & del Moral 2003; Madroño et al. 2004; Pleguezuelos et al. 2002) nos indican que actualmente el 50% de las especies de nuestros peces continentales se encuentra amenazada, así como el 30% de los anfibios, el 23% de los reptiles, el 19% de los mamíferos y el 33% de las aves nidificantes. En total, un 30% de los vertebrados de España se encuentra en alguna de las tres categorías de amenaza que establece la UICN ("en peligro crítico", "en peligro", o vulnerable") en sus criterios de 2001 (v 3.1).

Existe consenso en que las modificaciones de los hábitat naturales que han tenido lugar en las últimas décadas son la principal razón para explicar esta situación. A las amenazas que afectan a nuestros vertebrados se sobrepone una, cuyos efectos, ya constatables, se irán incrementando en el futuro: el cambio climático. Así, considerando las alteraciones climáticas proyectadas para el futuro, se estima que una elevada proporción de la biodiversidad Ibérica podrá encontrarse amenazada o empeorar su situación actual (Schroter et al. 2005; Thuiller et al. 2005a; Araújo et al. 2006; Levinsky et al. 2007; Huntley et al. 2008). ¿Cómo responderán las diferentes especies a los cambios en el clima? ¿Cuáles se verán beneficiadas y cuáles perjudicadas? ¿Es posible anticiparse para evitar pér-

didias en nuestra biodiversidad por un cambio en el clima causado por las actividades humanas?

Éstas y otras preguntas motivaron que el Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, a través de sus unidades que trabajan en cambio climático y en biodiversidad, promoviera una línea de trabajo para intentar encontrar algunas respuestas. Este trabajo, que investiga los impactos de las alteraciones climáticas durante el siglo XXI sobre la fauna de vertebrados terrestres de España peninsular es uno de los resultados. Análogamente, también se ha llevado a cabo otro estudio complementario sobre la flora y vegetación, considerando tanto las especies leñosas más representativas en nuestros ecosistemas como algunas de las especies más amenazadas.

Se trata, por tanto, de uno de los primeros intentos de investigar los impactos potenciales de las alteraciones climáticas sobre la biodiversidad de España peninsular. En ambos trabajos se emplean modelos bioclimáticos para caracterizar las relaciones actuales entre las distribuciones de las especies y el clima, para así proyectar las distribuciones hacia el futuro en respuesta a los cambios climáticos modelizados (e.g., Guisan & Zimmermann 2000; Pearson & Dawson 2003; Thuiller et al. 2008). Anteriores estudios utilizando modelos bioclimáticos se centraron en Europa como unidad (Schroter et al. 2005; Thuiller et al. 2005a; Araújo et al. 2006; Levinsky et al. 2007; Huntley et al. 2008), y fueron realizados a una resolución mas amplia (es decir, cuadrículas o rejillas de 50 Km.). También existen trabajos centrados en otros países europeos (e.g., Berry et al. 2002), pero en cualquier caso, los trabajos elaborados para España son los primeros realizados en el sur de Europa. También debe destacarse que un estudio paralelo sobre la fauna de vertebrados ha sido realizado para el conjunto de la península ibérica, incluyendo la información disponible para España y Portugal peninsulares (Araújo et al. 2011).

Esta "Evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación de la fauna de vertebrados española ante el cambio climático" se enmarca en el PNACC Español (Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático). Este plan se aprobó en el año 2006 para dar cumplimiento a los compromisos internacionales en la materia y planteando los siguientes objetivos:

- 1) Desarrollar los escenarios climáticos regionales para la geografía española.
- 2) Desarrollar y aplicar métodos y herramientas para evaluar los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en diferentes sectores socioeconómicos y sistemas ecológicos.
- 3) Incorporar al sistema español de I+D+i las necesidades más relevantes en materia de evaluación de impactos del cambio climático.
- 4) Realizar continuas actividades de información y comunicación de los proyectos.



**5)** Promover la participación de todos los agentes implicados en los distintos sectores y sistemas, con objeto de integrar la adaptación al cambio climático en las políticas sectoriales.

**6)** Elaborar informes específicos con los resultados de las evaluaciones y proyectos e informes periódicos de seguimiento de los proyectos y del conjunto del Plan Nacional de Adaptación.

El trabajo realizado responde a las necesidades planteadas por el segundo objetivo, aunque pueda interpretarse que también contribuye a los demás. Del mismo modo, genera conocimiento para contribuir a cumplir el objeto de la principal norma en materia de conservación de la biodiversidad actualmente en España, la Ley 42/2007, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. Así, para lograr la conservación, uso sostenible, mejora y restauración del patrimonio natural y de la biodiversidad es preciso disponer de información actualizada sobre su situación y estado, incluyendo todo aquello que podamos anticipar ante amenazas como el cambio climático. Para luchar contra sus impactos a la biodiversidad, la aplicación el enfoque precautorio resultará fundamental.

Finalmente, debe mencionarse que el libro se complementa con la página web "<http://www.ibiochange.mncn.csic.es/atlascc/>". En ella pueden encontrarse una aplicación que contiene un sistema de información geográfica que no necesita instalación. En esta aplicación se pueden montar todos los datos del proyecto, de forma que el usuario pueda crear sus propios mapas. Asimismo la página contiene información detallada de todos los modelos y los datos obtenidos de todas las simulaciones.

### 3.2 Objetivos

Los objetivos concretos planteados en este trabajo son los siguientes:

**1)** Evaluar posibles impactos y predecir la situación futura de los vertebrados españoles, con objeto de analizar los posibles efectos futuros del cambio climático sobre su distribución, como indicador de su estado de conservación. El proyecto se concibió como un primer paso cuyos resultados podrán orientar futuros análisis y, con esta premisa, la evaluación se centra en una selección de vertebrados representativos de la biodiversidad española. El análisis contempla dos niveles: individual (en relación a cada taxón seleccionado) y general (por grupos taxonómicos), determinando la distribución general de esta biodiversidad en la actualidad y su distribución potencial en el futuro. Para ello, es preciso realizar, mediante técnicas de análisis espacial y desarrollo de modelos de distribución potencial, análisis de los patrones de distribución y proyecciones de las potenciales modificaciones en estos patrones de distribución por efecto del cambio climático.

**2)** Identificación de potenciales actuaciones de conservación para minimizar la problemática del cambio climático en la biodiversidad analizada. Una vez identificados los taxones de nuestra fauna más vulnerables al cambio climático, se analizan y evalúan las distintas opciones de adaptación que pueden minimizar los impactos.

También se considera un objetivo del trabajo el establecimiento de una adecuada estrategia para la participación, comunicación y divulgación de los resultados, las conclusiones y las propuestas, de acuerdo con el marco general del PNACC, donde se indica que un aspecto fundamental de los proyectos de evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático es la participación de los agentes implicados que, potencialmente, puedan contribuir a la consecución de los objetivos marcados. Esta publicación forma parte de esta estrategia.

### 3.3 Ámbito de trabajo

El estudio cubre la superficie de la España peninsular. Excluye, por tanto, las Islas Baleares y Canarias, así como el resto de islas e islotes españoles. Tampoco se han considerado Ceuta y Melilla.

Estas exclusiones responden, fundamentalmente, a cuestiones metodológicas. La modelización en el ámbito insular requiere tratamientos específicos diferentes de los aquí aplicados, en los que los modelos se han elaborado mediante información continental. Por ello, su aplicación a la biodiversidad insular no garantizaría resultados satisfactorios. Se requiere, por tanto, análisis específicos para los taxones insulares, que quedan fuera del alcance de este trabajo.

Del mismo modo, otros taxones no considerados son aquellos que se consideran dependientes del medio acuático, continental o marino, así como taxones con carácter costero, como se indica en el apartado 4.1.

Finalmente, el trabajo se restringe a los vertebrados, grupo para el que, como ya se ha indicado, se dispone de un conocimiento amplio y bastante completo en relación a su distribución en España.

## 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.

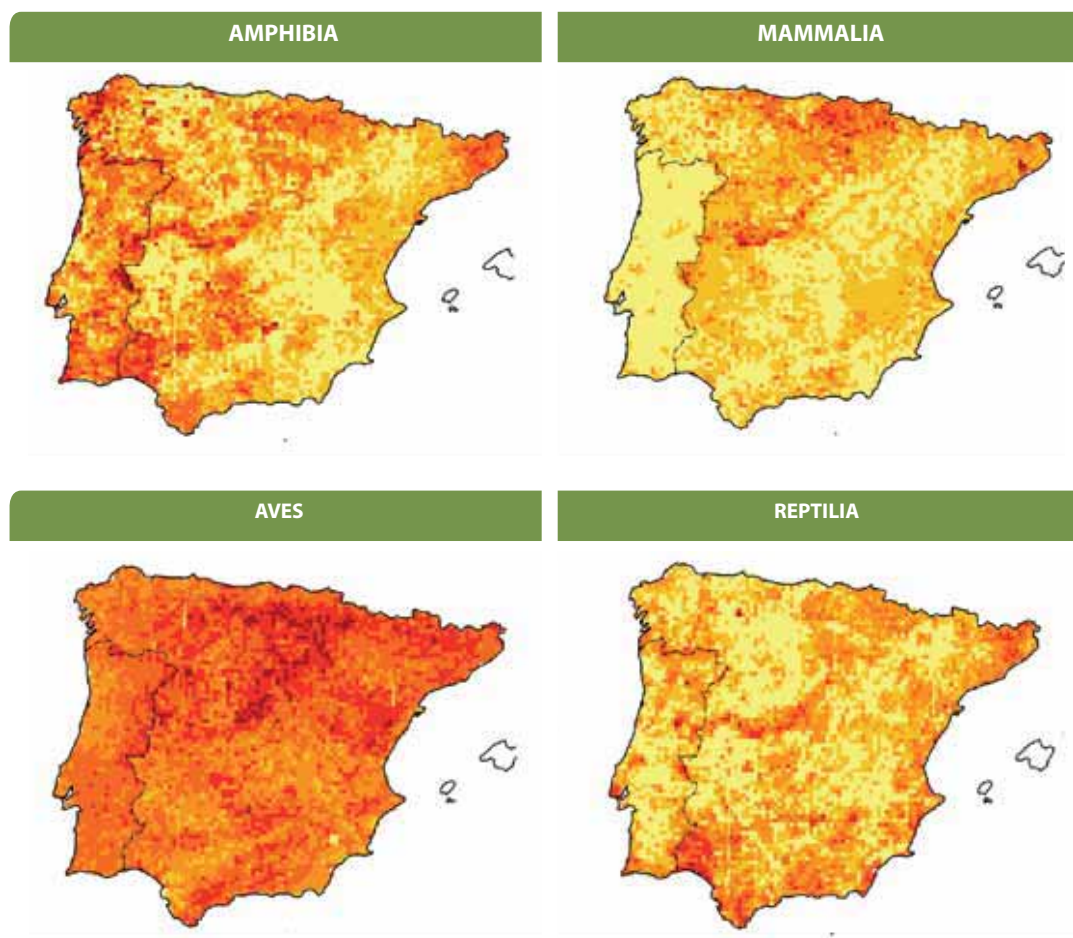


FIGURA 1 – RIQUEZA DE ANFIBIOS, REPTILES, MAMÍFEROS Y AVES EN EL SISTEMA DE CUADRÍCULAS UTM DE 10X10 KM. Riqueza elevada en color rojo, y menor en color amarillo.

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* / Salamancha 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* / Salamancha 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  
*Pyrrhonorax graculus* / Chova piquigualda

*Pyrrhonorax pyrrhonorax* / Chova piquirroja  
*Pyrrhula pyrrhula* / Camachuelo común  
*Regulus ignicapilla* / Reyezuelo listado  
*Regulus regulus* / Reyezuelo 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 castroviejei* / 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



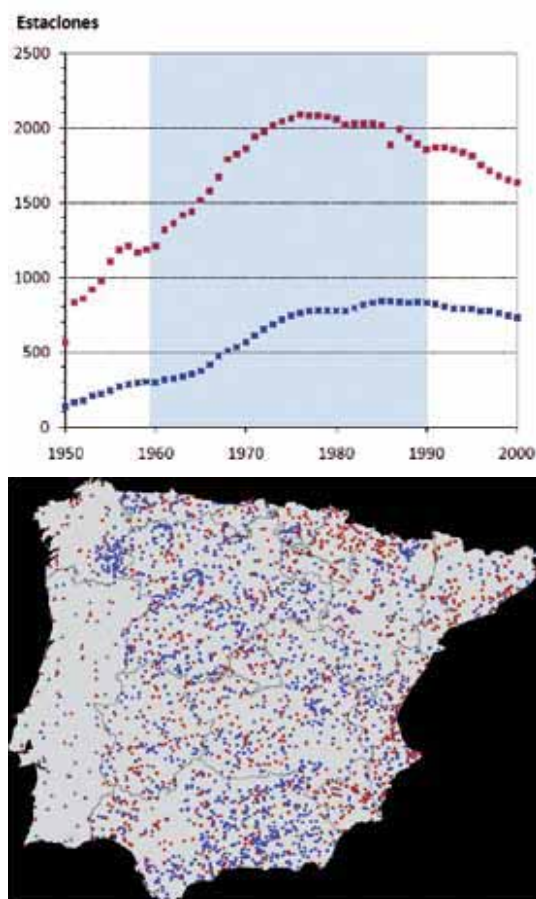


FIGURA 2 – DATOS CLIMÁTICOS. Arriba, evolución del número de estaciones meteorológicas disponibles entre 1950 y 2000; en rojo, estaciones pluviométricas; en azul, estaciones termométricas. Debajo, distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas para elaborar los mapas de clima actual (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-

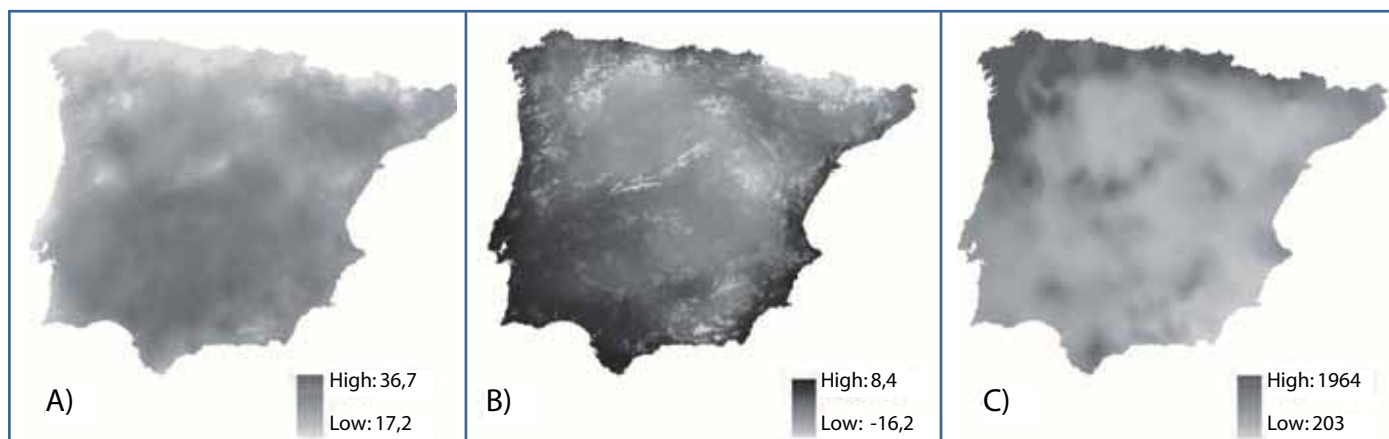


FIGURA 3 – DATOS CLIMÁTICOS INTERPOLADOS, BASADOS EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS: a) temperatura máxima del mes más caliente; b) temperatura mínima del mes más frío; c) precipitación media anual acumulada.

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).

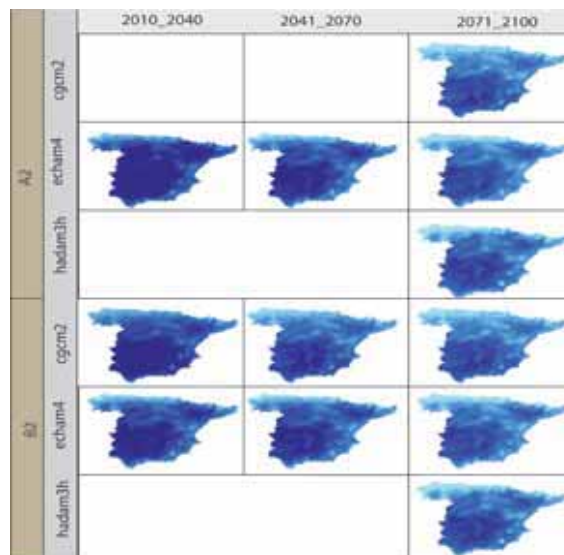


FIGURA 4 – TEMPERATURA MÁXIMA DEL MES MÁS CÁLIDO (°C) EN LOS PERIODOS DE REFERENCIA. Las proyecciones de climas futuros se basan en simulaciones de tres AOGCM (CGCM2, ECHAM4, hadCM3H) e incluyen los escenarios A2 y B2.

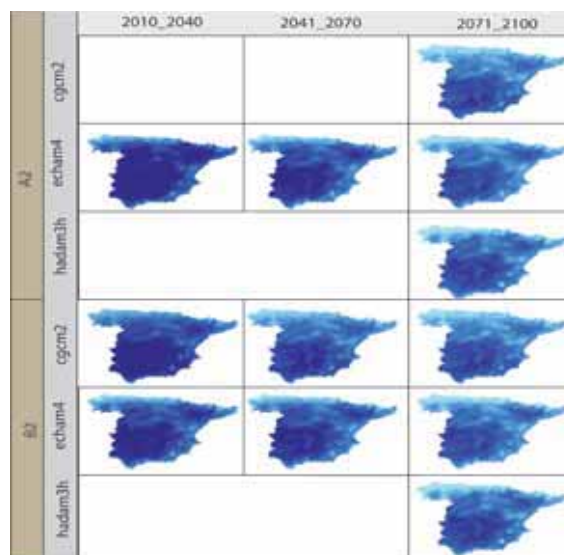


FIGURA 5 – TEMPERATURA MÍNIMA DEL MES MÁS FRÍO (°C) EN LOS PERIODOS DE REFERENCIA. Las proyecciones de climas futuros se basan en simulaciones de tres AOGCM (CGCM2, ECHAM4, hadCM3H) e incluyen los escenarios A2 y B2.

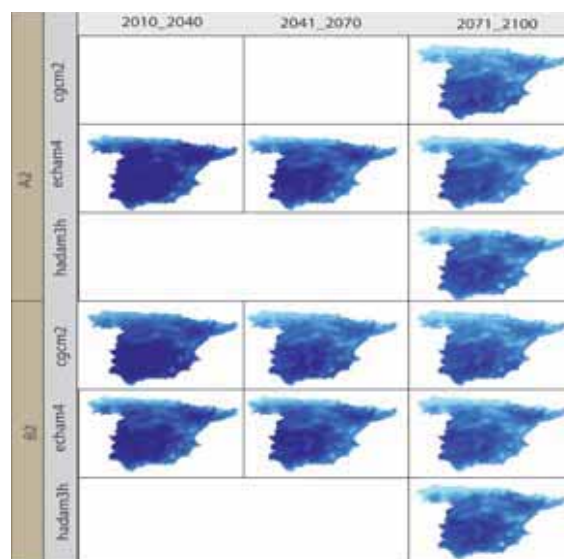


FIGURA 6 – PRECIPITACIÓN ANUAL TOTAL (MM) EN LOS PERIODOS DE REFERENCIA. Las proyecciones de climas futuros se basan en simulaciones de tres AOGCM (CGCM2, ECHAM4, hadCM3H) e incluyen los escenarios A2 y B2.

- 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-

trophy” (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:

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

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 sus 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
<b>ESTABLE</b>	No requiere medidas de adaptación.
<b>GANA</b>	No requiere medidas de adaptación.
<b>PIERDE</b>	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).
<b>DESPLAZAMIENTO</b>	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).



## Alteraciones en la distribución potencial de las especies

### Fotografía

**Breve descripción de la distribución y el hábitat de la especie,** con indicación de las condiciones límite de temperatura y precipitación en las que se encuentra actualmente.



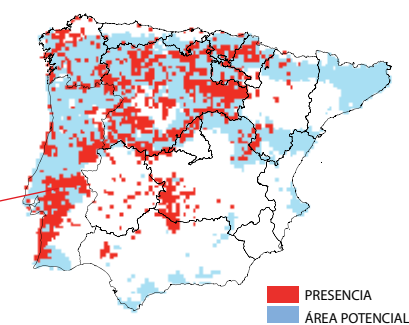
### Hyla arborea

**Hyla arborea (Ranita de San Antonio).** Se distribuye ampliamente por el sur, oeste y centro de Europa. En la Península Ibérica ocupa la submeseta norte y, de manera discontinua, algunas zonas meridionales, estando ausente de la costa mediterránea y los Pirineos. Frecuenta la vegetación palustre de los puntos de agua permanente donde habita. Se distribuye desde el nivel del mar hasta más de 2000 m. El rango de temperaturas de su distribución en la Península varía entre -9°C y 35.3°C, y el de precipitaciones entre 329 mm y 1944 mm al año.

© CÉSAR CAPENHA

**Mapa de distribución actual:** En rojo, área ocupada por la especie actualmente. En azul, área potencial en función de sus características climáticas. También se incluye el índice TSS, que ofrece información (entre -1 y 1) acerca de la capacidad de discriminación del modelo. Mayor el índice, más capacidad de discriminación tiene el modelo.

### SITUACIÓN ACTUAL



TSS: 0,4451

### SITUACIÓN FUTURA

ECHAM4  
CGCM2  
CGCM2 Y ECHAM4

### Evolución Prevista:

Bajo los escenarios climáticos disponibles para el siglo XXI, se esperan impactos elevados en la distribución potencial. Los modelos proyectan contracciones en la distribución potencial actual de la especie entre un 75% y un 80% en 2041-2070 y el nivel de coincidencia entre la distribución observada y potencial se reduce hasta un rango de entre un 9% y un 13% en 2041-2070.

**Evolución Prevista:** Impactos previstos para la especie, detallando cambios de distribución y solapamientos de la distribución prevista con la actual según el modelo ECHAM4.

### ESTADÍSTICAS

#### SUPERFICIES ACTUALES (KM2)

Presencia:	85600 (17%)	% Protegido actualmente:	(12%)
Área potencial:	216300	% Protegido futuro:	(1%)

	APF		OPF	
	A2	B2	A2	B2
<b>CGCM2</b>				
2011-2040	178600 (-17%)	180800 (-16%)	(63%)	(64%)
2041-2070	124500 (-42%)	147400 (-32%)	(42%)	(51%)
2071-2100	89100 (-59%)	136200 (-37%)	(27%)	(46%)
<b>ECHAM4</b>				
2011-2040	83600 (-61%)	86500 (-60%)	(24%)	(25%)
2041-2070	42200 (-80%)	54500 (-75%)	(9%)	(13%)
2071-2100	15400 (-93%)	36500 (-83%)	(3%)	(9%)

### Tabla de estadísticas:

En la zona superior, datos sobre la superficie ocupada actual (en km<sup>2</sup>). Se indican las superficies observada y potencial actuales y el porcentaje de solapamiento entre ambas. A la derecha, el porcentaje de la distribución actual en áreas protegidas y el porcentaje protegido en el futuro según la distribución potencial modelizada, considerando las actuales redes de espacios protegidos.

En la zona inferior, resultados para los modelos y escenarios en cada uno de los tres horizontes temporales. APF (área potencial futura) representa las superficies del área de distribución potencial, junto a su porcentaje de solapamiento con el área de distribución actual potencial (muestra la evolución del área potencial en el tiempo según modelos). OPF (ocupación potencial futura), muestra el solapamiento del área potencial actual con el área potencial futura. Ofrece una idea de la capacidad de mantenimiento y expansión.

**Cabecera**, donde se distinguen:

-Nombre científico y común de la especie

-Color de la cabecera, que indica el grado de afectación del cambio climático a la especie, pudiéndose distinguir:

**Rojo:** Pérdida mayor - con pérdidas de más del 70% de área potencial en el futuro

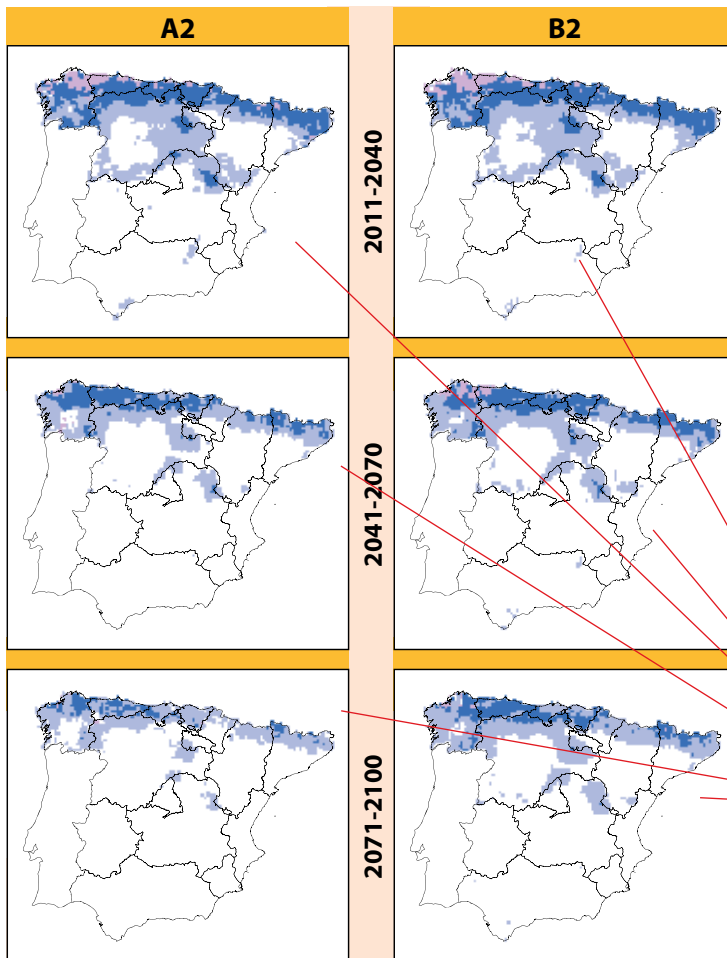
**Naranja:** Pérdida - con pérdidas de entre el 30% y el 70% del área potencial en el futuro

**Amarillo:** Estabilidad - sin pérdidas, o pérdidas inferiores al 30% del área potencial en el futuro

**Verde:** Ganancia - la especie gana superficie potencial en el futuro.

**(Ranita de San Antonio)**

ESTATUS ACTUAL **NT**



**Estado de conservación actual** de acuerdo con los Atlas y Libros Rojos elaborados a escala estatal

**Mapas de distribuciones potencial futura** para las combinaciones de modelos/escenarios/horizontes. Cada mapa muestra áreas en tres colores correspondiendo a los dos modelos representados y a su superposición:  
**Morado:** área potencial futura para el modelo ECHAM4 que no coincide con el área del CGCM2.  
**Azul claro:** área potencial futura para el modelo CGCM2 que no coincide con el área del ECHAM4  
**Azul oscuro:** área donde ambos modelos coinciden

**MEDIDAS DE ADAPTACIÓN**

- Protección jurídica.
- Medidas para conservación in situ.
- Medidas para conservación ex situ.
- Acciones para favorecer permeabilidad y conectividad.

**Medidas de adaptación propuestas.**

Bajo escenario A2 ECHAM4 para 2041-2070.

**5.1 Análisis por especies**

Se ha realizado una ficha para cada una de las especies modelizadas. La idea es sintetizar los resultados obtenidos para cada una de las especies modelizadas. Estas fichas ofrecen información sobre la especie, su distribución

potencial actual y las hipotéticas situaciones potenciales futuras, así como las medidas de adaptación sugeridas.

A continuación se muestra una ficha-modelo donde se especifica el significado de cada uno de los campos que se incluyen en las fichas.