



# Directrices de la CSE de UICN para evaluar la vulnerabilidad de las especies al cambio climático

Editores: Wendy B. Foden y Bruce E. Young



Publicación ocasional de la Comisión de Supervivencia de Especies de UICN No. 59

## **Acerca de la UICN**

La UICN es una Unión de Miembros compuesta por Estados soberanos, agencias gubernamentales y organizaciones de la sociedad civil. La UICN pone a disposición de las entidades públicas, privadas y no gubernamentales, los conocimientos y las herramientas que posibilitan, de manera integral, el progreso humano, el desarrollo económico y la conservación de la naturaleza.

Creada en 1948, la UICN se ha convertido en la red ambiental más grande y diversa del mundo. La UICN cuenta con la experiencia, los recursos y el alcance de sus más de 1300 organizaciones Miembro y los aportes de más de 10 000 expertos. La UICN es uno de los principales proveedores de datos, evaluaciones y análisis sobre conservación. Su extensa y diversa membresía hacen de la UICN una incubadora y un repositorio confiable de las mejores prácticas y herramientas de conservación, así como de las directrices y estándares internacionales.

La UICN proporciona un espacio neutral en el que actores diversos, incluyendo gobiernos, ONGs, científicos, empresas, comunidades locales, grupos indígenas, organizaciones religiosas y otros pueden trabajar juntos para crear e implementar soluciones a los retos ambientales y lograr un desarrollo sostenible.

La UICN trabaja con diversos socios y simpatizantes para llevar a la práctica un amplio y diverso portafolio de proyectos de conservación en todo el mundo. Estos proyectos, que combinan los últimos avances científicos con los conocimientos tradicionales de las comunidades locales, procuran detener y revertir la pérdida de hábitats, restaurar los ecosistemas y mejorar el bienestar humano.

<http://www.iucn.org/es>

<https://twitter.com/IUCN>

# Directrices de la CSE de UICN para evaluar la vulnerabilidad de las especies al cambio climático



# Directrices de la CSE de UICN para evaluar la vulnerabilidad de las especies al cambio climático

Editores: Wendy B. Foden y Bruce E. Young

Producido con el apoyo de



La presentación del material en esta publicación y las denominaciones empleadas para las entidades geográficas no implican en absoluto la expresión de una opinión por parte de la UICN o de otra organización participante sobre la situación jurídica de un país, territorio o zona, o de sus autoridades, o acerca de la demarcación de sus límites o fronteras.

Los puntos de vista que se expresan en esa publicación no reflejan necesariamente los de la UICN

La UICN y las organizaciones participantes declinan cualquier error u omisión en la traducción de este documento de la versión original en [inglés] al español. En caso de discrepancia, remítase, por favor, a la edición original. Título de la edición original: *IUCN SSC Guidelines for Assessing Species' Vulnerability to Climate Change*. Version 1.0. Occasional Paper of the IUCN Species Survival Commission No. 59. (2016). Publicado por: UICN, Cambridge, Reino Unido y Gland, Suiza: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.SSC-OP.59.en>

Publicado por: UICN, Cambridge, Reino Unido y Gland, Suiza

Derechos reservados: © 2020 Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales  
Se autoriza la reproducción de esta publicación con fines educativos y otros fines no comerciales sin permiso escrito previo de parte de quien detenta los derechos de autor con tal de que se mencione la fuente. Se prohíbe reproducir esta publicación para la venta o para otros fines comerciales sin el permiso escrito previo de quien detenta los derechos de autor.

Citación: Foden, W.B. y Young, B.E. (eds.) (2020). *Directrices de la CSE de UICN para Evaluar la Vulnerabilidad de las Especies al Cambio Climático*. Versión 1.0. Publicación ocasional de la Comisión de Supervivencia de Especies (de UICN) No. 59. Cambridge, Reino Unido y Gland, Suiza: Comisión para la Supervivencia de las Especies de UICN. x+117 pp.

Citación de capítulo sugerida (ejemplo): Huntley, B., Foden, W.B., Smith, A., Platts, P., Watson, J. y Garcia, R.A. (2020). Capítulo 5. Usando las EVCC e interpretando sus resultados. En: W.B. Foden y B.E. Young, editores. *Directrices de la CSE de UICN para evaluar la vulnerabilidad de las especies al cambio climático*. Versión 1.0. Publicación ocasional de la CSE de UICN No. 59. Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido. Pp 34-50. Originalmente publicado como *IUCN SSC guidelines for assessing species' vulnerability to climate change*. Version 1.0. Occasional Paper of the IUCN Species Survival Commission No. 59. Gland, Switzerland and Cambridge, UK. Pp 33–48.

Traducción: Ariany García Rawlins, Enrique Martínez Meyer, Pablo Marquet, Bruce Young

Disponible en línea: <http://www.iucn.org/theme/species/publications/guidelines> and [www.iucn-ccsg.org](http://www.iucn-ccsg.org)

ISBN: 978-2-8317-1979-5 (PDF)

DOI: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.SSC-OP.59.es>

Foto de portada: Oso polar cerca de Svalbard, Noruega. © Josef Friedhuber, Getty Images

Todas las fotografías utilizadas en esta publicación son propiedad del titular original de los derechos de autor (consultar las leyendas individuales para obtener los detalles). Está prohibida su reproducción o uso en otros contextos sin la autorización previa, por escrito, del titular de los derechos de autor.

Diseño realizado por: Barbara Creed, NatureBureau

Diseño Español

realizado por: Justin de Beer

Disponible en: UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza), Programa Global de Especies,  
Rue Mauverney 28, 1196 Gland, Switzerland  
Tel +41 22 999 0000, Fax +41 22 999 0002  
[www.iucn.org/resources/publications](http://www.iucn.org/resources/publications)

# Índice

Grupo de trabajo .....	viii
Editores .....	ix
Autores de los capítulos .....	ix
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Preparando la escena .....</b>	<b>5</b>
2.1 Definiciones de términos de uso común .....	5
2.2 Enfoques de la evaluación de vulnerabilidad al cambio climático .....	8
2.2.1 Enfoques correlativos .....	8
2.2.2 Enfoques basados en rasgos .....	9
2.2.3 Enfoques mecanicistas .....	9
2.2.4 Enfoques combinados .....	10
2.3 Medidas para calcular la vulnerabilidad al cambio climático .....	11
2.3.1 Índices de vulnerabilidad y otros sistemas de calificación relacionados .....	11
2.3.2 Cambios de área de distribución .....	11
2.3.3 Cambio en las poblaciones .....	11
2.3.4 Probabilidades de extinción .....	11
<b>3. Estableciendo las metas y objetivos de la evaluación de vulnerabilidad al cambio climático .....</b>	<b>13</b>
3.1 Definiendo la meta .....	13
3.1.1 ¿Por qué realiza usted esta EVCC? .....	13
3.1.2 ¿Cuál es su audiencia? .....	13
3.1.3 ¿Cuáles decisiones espera influenciar con los resultados? .....	13
3.2 Definiendo sus objetivos .....	13
3.2.1 Seleccionando un enfoque taxonómico .....	14
3.2.2 Seleccionar un enfoque espacial .....	14
3.2.3 Seleccionando un período de tiempo .....	14
<b>4. Seleccionando y evaluando los enfoques y métodos para las EVCC .....</b>	<b>17</b>
4.1 Pasos para seleccionar su enfoque y métodos para la EVCC .....	17
4.2 Enfoques para tres situaciones difíciles de EVCC: especies poco conocidas, de área de distribución pequeña y reducida .....	29
<b>5. Usando las EVCC e interpretando sus resultados .....</b>	<b>34</b>
5.1 Seleccionando y usando los datos de entrada .....	34
5.1.1 Extensión espacial y resolución .....	34
5.1.2 Períodos .....	35
5.1.3 Conjuntos de datos climáticos .....	35
5.1.4 Datos de distribución de las especies .....	40
5.1.5 Datos de rasgos de las especies .....	41
5.1.6 Considerando la disponibilidad de hábitat .....	46
5.2 Desafíos para aplicar los enfoques actuales de EVCC .....	47
5.2.1 Impactos directos versus indirectos del cambio climático .....	47
5.2.2 Interpretando los resultados de los modelos espacialmente explícitos .....	48
<b>6. Comprendiendo y trabajando con la incertidumbre .....</b>	<b>51</b>
6.1 Incertidumbre de los datos de distribución y abundancia de las especies .....	51
6.2 Incertidumbre de las proyecciones climáticas y los conjuntos de datos de referencia .....	52
6.3 Incertidumbre de la selección de variables bioclimáticas .....	53
6.4 Incertidumbre por evidencia, potencialmente incompleta, de los nichos de las especies .....	53
6.5 Incertidumbre asociada a los rasgos biológicos y datos demográficos .....	53
6.5.1 Cambios de los rasgos en el tiempo .....	54

6.6 Incertidumbre asociada a la selección del método .....	54
6.6.1 Enfoques correlativos .....	54
6.6.2 Enfoques basados en rasgos .....	56
6.7 Validación de la EVCC .....	56
<b>7. La Lista Roja de UICN y la vulnerabilidad al cambio climático .....</b>	<b>59</b>
7.1 Usando los resultados de la EVCC en la Lista Roja de UICN .....	59
7.2 Tres escenarios de usuarios para la consideración del cambio climático en las Listas Rojas .....	61
<b>8. Comunicando los resultados de las EVCC .....</b>	<b>63</b>
<b>9. Direcciones futuras de las EVCC de especies .....</b>	<b>65</b>
9.1 Validación de las evaluaciones .....	65
9.2 Mejores y más coordinados datos de biodiversidad .....	65
9.3 Avanzando la metodología de las EVCC .....	65
9.3.1 Métodos combinados o “híbridos” basados en las fortalezas de los diferentes enfoques .....	65
9.3.2 Incluyendo los efectos de los cambios de frecuencia y magnitud de la variabilidad y los extremos climáticos .....	65
9.3.3 Incluyendo las interacciones entre las especies .....	66
9.3.4 Incluyendo las respuestas humanas al cambio climático .....	66
9.3.5 Incluyendo las interacciones entre el cambio climático y otras amenazas .....	66
9.3.6 Considerando los cambios que ya ocurrieron en las especies debido al cambio climático .....	66
9.3.7 Mejorando los datos de rasgos y la selección de los umbrales de vulnerabilidad .....	66
9.3.8 Incorporando cambios genéticos adaptativos y plasticidad fenotípica .....	67
9.3.9 Aprovechando los avances en las aproximaciones –ómicas y secuenciación de próxima generación .....	67
9.4 Mejorar el intercambio de información entre la investigación en conservación y las comunidades que la practican .....	68
9.5 Mejorar el uso de la EVCC para apoyar la planificación de la conservación .....	68
9.6 Explorar la relación entre la EVCC de especies y sus implicaciones para las personas .....	68
<b>10. Estudios de caso .....</b>	<b>69</b>
Estudio de caso 1. Un enfoque correlativo para las aves australianas de la sabana tropical .....	71
Estudio de caso 2. Desarrollo de un marco para identificar estrategias de adaptación al cambio climático para la Red de Áreas Importantes para Aves Africanas .....	73
Estudio de caso 3. De vuelta a los principios con los anfibios africanos .....	76
Estudio de caso 4. Explorando los impactos de la reducción del hielo oceánico sobre los osos polares y sus presas, la foca anillada y la foca barbuda, al norte del Mar de Barents .....	80
Estudio de caso 5. Peces de agua dulce de las montañas Apalaches, EE. UU. ....	84
Estudio de caso 6. EVCC basada en rasgos de UICN de los corales de arrecife de aguas cálidas a nivel global .....	86
Estudio de caso 7. Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la red de áreas protegidas del oeste de África para aves, mamíferos y anfibios .....	90
Estudio de caso 8. EVCC de enfoque correlativo-mecánico del lince ibérico .....	93
Estudio de caso 9. Combinación de los rasgos funcionales de las especies con las proyecciones del modelo correlativo en un enfoque combinado de EVCC .....	95
Estudio de caso 10. Enfoque combinado para EVCC de la mariposa de montaña ojitos ( <i>Erebia epiphron</i> ) y el escarabajo ciervo ( <i>Lucanus cervus</i> ) en Gran Bretaña .....	98
<b>11. Referencias .....</b>	<b>101</b>



<b>12. Apéndice .....</b>	<b>113</b>
Apéndice Tabla A. Ejemplos de métodos que se han utilizado para aplicar un enfoque correlativo al EVCC .....	113
Apéndice Tabla B. Ejemplos de métodos que se han utilizado para aplicar un enfoque basado en rasgos biológicos al EVCC ..	114
Apéndice Tabla C. Ejemplos de métodos que se han utilizado para aplicar un enfoque mecanicista al EVCC .....	114
Apéndice Tabla D. Ejemplos de métodos que se han utilizado para aplicar un enfoque combinado la EVCC .....	115
Referencias apéndice.....	116

## Cuadros

Cuadro 1. Recursos literarios para la evaluación de la adaptación y vulnerabilidad al cambio climático .....	3
Cuadro 2. Comparación de los términos de vulnerabilidad al cambio climático en uso .....	5
Cuadro 3. Tipos de especies que representan desafíos para la realización de EVCC .....	22
Cuadro 4. Seleccionar el(los) método(s) para aplicar los enfoques de EVCC.....	28
Cuadro 5. El cambio climático y las directrices para utilizar las categorías y los criterios de la Lista Roja de la UICN .....	59
Cuadro 6. El potencial de los enfoques –ómicos para el manejo de especies amenazadas.....	67

## Tablas

Tabla 1. Lista indicativa para identificar objetivos claros y cuantitativos.....	14
Tabla 2. Ejemplos heurísticos de los objetivos EVCC.....	15
Tabla 3. Ejemplos de estudios de EVCC y/o resultados a nivel de especies de acceso público que pueden ser útiles para cumplir los objetivos de los usuarios .....	18
Tabla 4. Categorías de los objetivos de las EVCC, ejemplos de los resultados necesarios para lograrlos y los enfoques potencialmente capaces de obtenerlos .....	20
Tabla 5. Resumen de los recursos de datos generalmente requeridos por cada enfoque de EVCC.....	21
Tabla 6. Ejemplos de recursos de datos disponibles para la realización de EVCC .....	23
Tabla 7. Enfoques para tres situaciones difíciles de EVCC .....	31
Tabla 8. Ejemplos de los conjuntos de datos climáticos más utilizados y generalmente disponibles que representan las condiciones climáticas históricas (de referencia o pasado reciente).....	38
Tabla 9. Categorías de rasgos asociadas con la elevada sensibilidad y poca capacidad de adaptación de las especies al cambio climático .....	42
Tabla 10. Ejemplos de los rasgos considerados en cinco EVCC basadas en rasgos .....	43
Tabla 11. Ejemplos de las audiencias de las EVCC, los tipos de información que requieren, y algunos medios de comunicación útiles para informarles sobre las EVCC y sus resultados. ....	63
Tabla 12. Lista de estudios de caso y los enfoques, ecosistemas, escalas espaciales y escenarios de recursos que cubren.....	69
Tabla 13. Clave para seleccionar estudios de casos adecuados a sus objetivos de EVCC.....	70
Apéndice Tabla A.....	113
Apéndice Tabla B.....	114
Apéndice Tabla C. ....	114
Apéndice Tabla D. ....	115

## Figuras

Figura 1. Audiencia específica para la que se desarrollaron estas directrices.....	2
Figura 2. Diagrama esquemático de tres componentes de la vulnerabilidad en las EVCC.....	5
Figura 3. El riesgo a impactos relacionados con el clima surge de la interacción de los peligros climáticos.....	5
Figura 4. Cinco parámetros claves para describir la vulnerabilidad de la biodiversidad al cambio climático. ....	7
Figura 5. Resumen de los tres enfoques principales de EVCC (1–3), las seis categorías que pueden crear sus combinaciones y ejemplos publicados de su uso. ....	8
Figura 6. Las cuatro medidas principales o tipos de información que resultan de una EVCC y los enfoques que las producen. ..	11
Figura 7. Pasos conceptuales para una EVCC de especies, incluyendo el establecimiento de objetivos, la identificación y evaluación de evaluaciones existentes y la realización de nuevas EVCC y la interpretación de sus resultados. Los recursos incluyen los datos, el tiempo y la experiencia. ....	17
Figura 8. Pasos para evaluar la pertinencia de los estudios de EVCC .....	19
Figura 9. Marco para interpretar los resultados de los enfoques y métodos múltiples de EVCC de acuerdo a un enfoque de consenso. ....	28
Figura 10. Matriz de confusión.....	55

## **Grupo de trabajo**

**Wendy B. Foden** (Universidad de Stellenbosch) (Presidente)

**Bruce E. Young** (NatureServe) (Vicepresidente)

**Resit Akçakaya** (Universidad Stonybrook)

**David Baker** (Universidad de Durham)

**David Bickford** (Universidad Nacional de Singapur)

**Stuart Butchart** (BirdLife International)

**Jamie Carr** (UICN)

**Raquel A. Garcia** (Centro de Biología Invasiva, Universidad de Stellenbosch)

**Ary Hoffmann** (Universidad de Melbourne)

**David Hole** (Conservación Internacional)

**Brian Huntley** (Universidad de Durham)

**Kit Kovacs** (Instituto Polar Noruego)

**Robert Lacy** (Sociedad Zoológica de Chicago)

**Tara Martin** (CSIRO, Universidad de Columbia Británica)

**Guy Midgley** (Universidad de Stellenbosch)

**Michela Pacifici** (Universidad de Roma “Sapienza”)

**James Pearce-Higgins** (“British Trust for Ornithology”)

**Paul Pearce-Kelly** (Sociedad Zoológica de Londres)

**Richard Pearson** (Escuela Universitaria de Londres)

**Philip Platts** (Universidad de York)

**April Reside** (Universidad James Cook)

**Carlo Rondinini** (Universidad de Roma “Sapienza”)

**Brett Scheffers** (Universidad de Florida)

**Adam B. Smith** (Jardín Botánico de Missouri)

**Mark Stanley Price** (Universidad de Oxford)

**Chris D. Thomas** (Universidad de York)

**Piero Visconti** (Sociedad Zoológica de Londres, Escuela Universitaria de Londres)

**James Watson** (Sociedad de Conservación de la Vida Silvestre, Universidad de Queensland)

**Christopher Wheatley** (Universidad de York)

**Neville Williams** (Parque de Vida Silvestre de Yorkshire)

**Stephen Williams** (Universidad James Cook)

**Stephen Willis** (Universidad de Durham)

## Editores

Wendy B. Foden  
Bruce E. Young

## Autores de los capítulos

### 1. Introducción

Wendy B. Foden  
Bruce E. Young  
James Watson

### 2. Preparando la escena

Wendy B. Foden  
Michela Pacifici  
David Hole

### 3. Estableciendo metas y objetivos de evaluación de vulnerabilidad al cambio climático

Bruce E. Young  
Tara Martin  
James Watson  
Wendy B. Foden  
Stephen Williams  
Brett Scheffers

### 4. Seleccionando y evaluando enfoques y métodos de EVCC

Wendy B. Foden  
Raquel A. Garcia  
Philip Platts  
Jamie Carr  
Ary Hoffmann  
Piero Visconti

### 5. Usando las EVCC e interpretando sus resultados

Brian Huntley Wendy B. Foden Adam Smith Philip Platts James Watson Raquel A. Garcia

### 6. Entendiendo y trabajando con la incertidumbre

Brian Huntley  
Wendy B. Foden  
James Pearce-Higgins  
Adam Smith

### 7. Las Listas Rojas de UICN y Vulnerabilidad al Cambio Climático

Wendy B. Foden  
Resit Akçakaya

### 8. Comunicando resultados de EVCC

David Bickford  
Bruce E. Young  
Jamie Carr  
David Hole  
Stuart Butchart

### 9. Direcciones futuras en EVCC de especies

Wendy B. Foden  
James Watson  
Ary Hoffmann  
Richard Corlett  
David Hole

### 10. Estudios de caso

1. April Reside
2. David Hole y Stephen Willis
3. Philip Platts y Raquel A. Garcia
4. Robert Lacy y Kit Kovacs
5. Bruce E. Young
6. Wendy B. Foden
7. David Baker y Stephen Willis
8. Resit Akçakaya
9. Raquel A. Garcia
10. Christopher Wheatley y Christopher Thomas

# Agradecimientos

El Grupo de Trabajo agradece a Cheryl Williams, Neville Williams y la Fundación del Parque de Vida Silvestre de Yorkshire por financiar generosamente la preparación para la publicación de las normas y su apoyo general para su lanzamiento; a Simon Stuart y la Secretaría de la CSE, especialmente a Kira Husher, por respaldar la producción de estas normas, incluyendo su apoyo financiero, obtención de fondos y ayuda para organizar y gestionar el Grupo de Especialistas en Cambio Climático; a la Universidad James Cook, especialmente a Yvette Williams, por apoyar la planificación del taller que produjo estas normas y ayudar con la logística; al Instituto Polar Noruego por su apoyo financiero; y a todas las instituciones de los miembros del Grupo de Trabajo por su apoyo durante la realización de estas normas. Bruce Young agradece a Chevron por apoyar su contribución en la realización de estas normas.

Wendy Foden agradece a la Fundación Nacional de Investigación Sudafricana, el Consejo de Investigación Científica e Industrial de Sudáfrica (CSIR, por sus siglas en inglés), a Nigel Leader-Williams y la Universidad de Cambridge, a las Universidades de Stellenbosch y de Witwatersrand, la Escuela de Estudios de Animales, Plantas y Ambientales Wits, y al Instituto de Investigación sobre el Cambio Global y la Sostenibilidad por su apoyo.

Agradecemos, por su apoyo para la realización de este documento, a Barbara Creed y Aurea Paquete de NatureBureau (diseño), Dave Wright (referencias y leyendas de las fotos), Anché Louw (coordinación de las fotografías; Anché recibió el respaldo de la Universidad de Stellenbosch), Nick Cowley (revisión), Joseph Lindsay (diseño de los gráficos) y a todos los fotógrafos por permitirnos usar sus hermosas imágenes en esta publicación.

Finalmente, agradecemos especialmente a Joanna Brehm, Jyotirmoy Shankar Deb, Myfanwy Griffith, Danielle de Jong, Axel Hochkirch, John Gross y Bruce Stein por sus incalculables comentarios y sugerencias, los cuales mejoraron sustancialmente la calidad del manuscrito. Lamentamos que las limitaciones de tiempo no nos permitieron incorporar todos los comentarios útiles en esta versión de las Directrices.

Los autores agradecen a Jon Paul Rodríguez y la Comisión de Supervivencia de Especies de la UICN por financiar la traducción al castellano. Agradecen también al traductor Ariany García Rawlins y los revisores de la edición en castellano Enrique Martínez Meyer y Pablo Marquet. El diseño de esta edición fue a cargo de Barbara Creed y Justin de Beer.

También agradecemos el apoyo de Tom Brooks y el Programa de Ciencias de la UICN.

# 1. Introducción

Wendy B. Foden, Bruce E. Young y James Watson

Ya se observan cambios en un amplio intervalo de componentes del sistema climático de la Tierra (García et al., 2014b), y se predicen cambios que ya están en curso, incluyendo cambios en patrones y tendencias a largo plazo, en la magnitud y frecuencia de eventos climáticos extremos agudos, e impactos secundarios como pérdida del hielo marino y aumentos del nivel del mar. Estos están acompañados por aumentos en la concentración atmosférica de dióxido de carbono y la acidificación oceánica. Estos cambios están teniendo impactos de amplio alcance en la biodiversidad (Thomas et al., 2004; Fischlin et al., 2007; IPCC, 2014), incluyendo cambios a niveles de organismos, subpoblaciones, especies y ecosistemas. Para algunas especies, los impactos netos han sido positivos (Fraser et al., 1992; Urban et al., 2007; Kearney & Porter, 2009), pero para muchos más, la velocidad, magnitud y tasa de cambio de los mismos tienen consecuencias negativas en la reproducción y supervivencia de los individuos, lo que puede causar la extinción local o hasta global de especies (Caswell et al.,

2009; Jenouvrier et al., 2009; Hunter et al., 2010; Fordham et al., 2013a; Settele et al., 2014). Las proyecciones muestran que hasta en los escenarios más optimistas de emisión, los impactos del cambio climático en la biodiversidad serán progresivamente más graves durante el próximo siglo y más adelante (IPCC, 2014).

Los impactos del cambio climático pueden manifestarse de manera directa, como en el estrés fisiológico que sufren los organismos cuando las temperaturas de verano del ambiente exceden sus tolerancias. Los impactos directos generalmente incluyen cambios conductuales, fenológicos y reproductivos y a la larga, en la supervivencia del organismo y potencialmente en su subpoblación y en las especies. Otros impactos ocurren de manera indirecta a través de sus efectos sobre las interacciones con otras especies incluyendo las presas, depredadores, competidores, parásitos o huéspedes, o sobre el hábitat de alguna especie, como también a través de sus interacciones con otros procesos y amenazas como la

Una vista aérea de la Gran Barrera de Coral. Uno de los ejemplos más claros de vulnerabilidad ante los impactos duales de cambio climático del calentamiento global y la acidificación del océano a nivel de las especies y los ecosistemas. © Paul Pearce-Kelly





pérdida de hábitat. Las reacciones y respuestas humanas al cambio climático (p.ej., cambio en las áreas agrícolas, la construcción de represas y diques, y la migración) también pueden impactar considerablemente la supervivencia de las especies y su capacidad de adaptación al cambio climático (Maxwell et al., 2015; Segan et al., 2015). Probablemente aún existen mecanismos de impacto del cambio climático sobre las especies por descubrir.

La predicción de los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad es un gran desafío científico (Pereira et al., 2010; Pacifici et al., 2015), pero es importante lograrlo por muchas razones. Las evaluaciones de los grados de amenaza o el riesgo de extinción (p.ej., a través de la Lista Roja de UICN) generalmente proporcionan información esencial para informar los planes de acción para la conservación, y las leyes y regulaciones. Además, la planificación de adaptación al cambio climático normalmente requiere información sobre los mecanismos y patrones de impacto para que se puedan identificar y evaluar las acciones apropiadas. Desde que se reconoció la amenaza del cambio climático hace algunas décadas, la comunidad de científicos preocupados por la conservación se ha enfrentado al desafío de evaluar la vulnerabilidad al cambio climático. Se han desarrollado diferentes métodos para la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático (EVCC) de las especies y se está produciendo una gran y creciente cantidad de literatura científica al respecto. Nuestra motivación para realizar este documento es disminuir la magnitud del desafío que enfrentan los conservacionistas al interpretar y utilizar la compleja y frecuentemente inconsistente literatura sobre EVCC.

No hay una sola manera “correcta” o establecida para realizar una EVCC de especies. Nuestro objetivo al realizar este documento es guiar a los usuarios a través de enfoques sensibles y justificables, dado el estado actual de conocimiento y sus objetivos y recursos disponibles. Considerando lo rápido que se está desarrollando este nuevo y emocionante campo, anticipamos que el documento deberá ser actualizado regularmente mejorando sus versiones subsecuentes. Nuestro público destinatario incluye, entre otros, los

profesionales de la conservación (p.ej., para realizar EVCC de sus especies focales o las especies en sus áreas focales) e investigadores (p.ej., para realizar EVCC para la conservación o para evaluar la rigurosidad de otros estudios) (**Figura 1**). En este documento nos enfocamos en las EVCC de especies, pero de ninguna manera significa que las evaluaciones a escala de hábitat o ecosistemas sean menos importantes.

Este documento guía ha sido desarrollado por un grupo de trabajo de Evaluación de la Vulnerabilidad al Cambio Climático reunido bajo el Grupo de Especialistas sobre el Cambio Climático de la Comisión de Supervivencia de Especies de UICN. La experiencia conjunta de los autores cubre un amplio intervalo de ecosistemas, grupos taxonómicos, sectores de conservación y regiones geográficas, y ha sido complementada con una extensa revisión de la literatura. Ninguna guía sobre este tema puede ser exhaustiva; sin embargo, esperamos que proporcione una referencia útil para aquellos que desean entender y evaluar los impactos del cambio climático en sus especies focales a escala de sitio, red de sitios y/o a escalas espaciales más amplias. Dado que éstas directrices serán revisada en las versiones siguientes, valoramos mucho cualquier respuesta o sugerencia.

La EVCC provee una base sólida para lograr una conservación efectiva ante el cambio climático. Existen recursos importantes sobre aspectos más amplios del cambio climático y la conservación, incluyendo la adaptación al cambio climático de las especies y los ecosistemas (consulte el **Cuadro 1**). Dado que la evaluación de vulnerabilidad es un paso importante para la planificación de medidas de adaptación (Stein et al., 2014), la mayoría de estas publicaciones cubren de alguna forma la evaluación de vulnerabilidad al cambio climático de las especies, hábitats y ecosistemas. Sin embargo, la guía que presentamos es más detallada y extensiva y se enfoca principalmente en la EVCC de especies. Alentamos a nuestros lectores a utilizar nuestra guía junto con literatura más amplia sobre la conservación y el cambio climático.



**Figura 1.** Audiencia específica para la que se desarrollaron estas directrices

**Cuadro 1.** Recursos literarios para la evaluación de la adaptación y vulnerabilidad al cambio climático

- Responding to Climate Change: Guidance for Protected Area Managers and Planners (Respondiendo al Cambio Climático: Guía para Administradores y Planificadores de Áreas Protegidas). Desarrollado por la Comisión Mundial de Áreas Protegidas de la UICN (Gross et al., 2016).
- Climate-Smart Conservation: Putting Adaptation Principles into Practice (Conservación Climática Inteligente: Puesta en Práctica de los Principios de Adaptación). Desarrollado por la Federación Nacional de Fauna de EE. UU. (Stein et al., 2014).
- Climate Change Vulnerability Assessment for Natural Resources Management: Toolbox of Methods with Case Studies (Evaluación de Vulnerabilidad al Cambio Climático para la Gestión de Recursos Naturales). Desarrollado por el Servicio de Pesca y Fauna Silvestre de EE. UU. (Johnson, 2014).
- Scanning the Conservation Horizon: A Guide to Climate Change Vulnerability Assessment. (Explorando el Horizonte de la Conservación: Una Guía para la Evaluación de la Vulnerabilidad al Cambio Climático). Desarrollado por un grupo de trabajo de instituciones estadounidenses gubernamentales, sin fines de lucro y académicas. (Glick et al., 2011)
- Climate Change and Conservation: A Primer for Assessing Impacts and Advancing Ecosystem-based Adaptation in The Nature Conservancy (El Cambio Climático y la Conservación: un Manual para Evaluar los Impactos y Avanzar la adaptación Basada en Ecosistemas en la Conservación de la Naturaleza) (Groves et al., 2010).
- The IUCN SSC Guidelines on Species Conservation Planning Directrices de la CSE de UICN para la Planificación de la Conservación de las Especies) (UICN/CSE 2008; versión actualizada en preparación).
- The Adaptation for Conservation Targets (ACT) Framework: A Tool for Incorporating Climate Change into Natural Resource Management (La Adaptación para el Marco de los Objetivos de Conservación (ACT, por sus siglas en inglés): una Herramienta para Incorporar el Cambio Climático al Manejo de los Recursos Naturales) (Cross et al., 2012a, 2013).
- Voluntary guidance for states to incorporate climate change into state wildlife action plans and other management plans (Orientación voluntaria para que los estados incorporen al cambio climático en los planes de acción estatales de vida silvestre y otros planes de manejo). Desarrollado por la Asociación de Agencias de Pesca y Vida Silvestre (AFWA por sus siglas en inglés, 2009).
- The Climate Adaptation Knowledge Exchange (El Intercambio de Conocimiento sobre la Adaptación al Clima) (<http://www.cakex.org>)

Estas directrices cubren un esquema de algunos de los términos que son utilizados comúnmente en la evaluación de vulnerabilidad al cambio climático (EVCC), y describe tres enfoques de EVCC principales, concretamente los enfoques correlativo (basado en nichos), mecanicista, y el basado en rasgos. Discutimos cómo establecer objetivos de EVCC claros y medibles y cómo seleccionar enfoques de EVCC y métodos relacionados que sean apropiados para cumplir tales objetivos. Luego proporcionamos procedimientos explícitos para que los usuarios evalúen sus datos, conocimientos y recursos tecnológicos, para que luego perfeccionen su selección de enfoque y método. La guía para el uso y la interpretación de los resultados de las EVCC incluye sugerencias sobre las fuentes de datos y su uso, el trabajo con lagunas de conocimiento e incertidumbres, el uso de las EVCC para la creación de Listas Rojas, enfoques para cuestionar los contextos de evaluación de especies y cómo incluir impactos indirectos del cambio climático como la transformación de hábitats. También discutimos la mejor manera para comunicar los resultados a fin de tomar decisiones y realizar recomendaciones sobre las direcciones futuras en el campo de las EVCC de especies. Finalmente, suministramos estudios de caso que demuestran la aplicación de las directrices, inclusive en los procedimientos de elaboración de las Listas Rojas de UICN. A través de estas directrices esperamos

promover la estandarización de la terminología de las EVCC y proporcionar una herramienta útil para aquellos que deseen realizar EVCC de especies para informar sobre la conservación a escala de especies, sitios o red de sitios. Creemos que al ayudar a los conservacionistas a realizar EVCC sólidas de especies, estos obtendrán una base sólida para sus estrategias y planes de acción ante el cambio climático.

Esta guía está estructurada para proporcionar a los lectores primero de información contextual sobre las definiciones y medidas asociadas con las EVCC. Luego, una discusión sobre la identificación de objetivos de las EVCC, proporcionando orientación fundamental sobre cómo seleccionar y aplicar los métodos apropiados. Las siguientes secciones se enfocan en la interpretación y comunicación de resultados y proporcionan sugerencias sobre cómo utilizar los resultados para las evaluaciones de Listas Rojas y abordar las muchas fuentes de incertidumbre en las EVCC. La sección final explora las direcciones futuras de las EVCC y las necesidades de investigación. La guía finaliza con diez estudios de caso que suministran ejemplos de EVCC que cubren el intervalo de métodos descritos.





Arriba y abajo a la izquierda: Los corales “cacho de venado” (p.ej., *Acropora cervicornis*) se blanquean cuando expulsan sus algas *Zooxanthellae* por las altas temperaturas del mar y pierden su fuente de alimentación y color. Cuando las temperaturas de la superficie del mar son consistentemente superiores al umbral de blanqueamiento, grandes arrecifes coralinos mueren, se rompen y se convierten en escombros. © Emre Turak. Abajo a la derecha: Paul Pearce-Kelly observa el blanqueamiento de los corales en la Gran Barrera de Coral. © Paul Pearce-Kelly.



## 2. Preparando la escena

Wendy B. Foden, Michela Pacifici y David Hole

### 2.1 Definiciones de términos de uso común

#### Cambio climático

La evaluación más reciente (quinta) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define el cambio climático como “*un cambio del estado del clima que se puede identificar (a través de pruebas estadísticas, por ejemplo) por los cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades y que persiste por un período extendido, normalmente décadas o más*” (IPCC, 2013a). El cambio climático surge tanto por los ciclos naturales globales como por los impulsores o motores externos de cambio como los cambios en los ciclos solares, las erupciones volcánicas y las influencias humanas persistentes sobre la composición de la atmósfera o la superficie terrestre. El término se usa comúnmente, tanto en la literatura científica como en un contexto global más amplio, para describir los cambios que surgen única o principalmente por las actividades humanas ya sea a escala local, regional o global y muchos consideran que se inició al comienzo de la Revolución Industrial en el siglo XVIII.

Notamos que la comunidad científica detrás de los modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés) defiende enfáticamente el uso del término “escenario” en vez de “predicción” para referirse a los resultados de los modelos basados en las rutas de emisiones. La diferencia fundamental es que los escenarios usan una explícita “si... entonces...” mientras muchas veces olvidamos la parte del “si...” al usar el término “predicción”. A

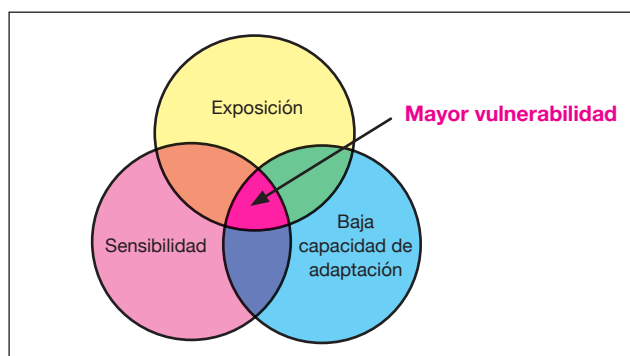
pesar de que la diferencia es semántica aborda la gran probabilidad de que el mundo no evolucionará exactamente como indican nuestros modelos, aún cuando las condiciones socioeconómicas conformasen exactamente las mismas de un escenario particular de emisión. Las EVCC deben ser consideradas de acuerdo a los escenarios, dadas las muchas incertidumbres que acarrearán.

#### Vulnerabilidad

La vulnerabilidad es un concepto central de la investigación y creación de políticas del cambio climático, tanto en el campo ambiental como en el del desarrollo humano. A pesar de que existe el consenso de que el término representa “una medida de un posible daño futuro” (Hinkel, 2011), muchas veces su uso es vago e inconsistente dentro y entre los campos mencionados (Ionescu et al., 2009; Hinkel, 2011). En el quinto informe de evaluación del IPCC (IPCC, 2014), las definiciones de los términos claves discrepan de las establecidas en informes anteriores (p.ej., IPCC, 2007). Utilizamos la definición del informe del IPCC 2007, ya que estas definiciones fueron adoptadas ampliamente y generalizadas en las comunidades científicas preocupadas de la conservación y de la adaptación, y porque se ajustan a su consideración, en la Lista Roja de la UICN, como una categoría riesgo. Exploramos las diferencias y similitudes de las dos definiciones en el **Cuadro 2** (incluyendo las **Figuras 2 y 3**), donde se consolidan y resaltan algunos aspectos de las definiciones existentes y, en la medida de lo posible, se organizan ambas a continuación.

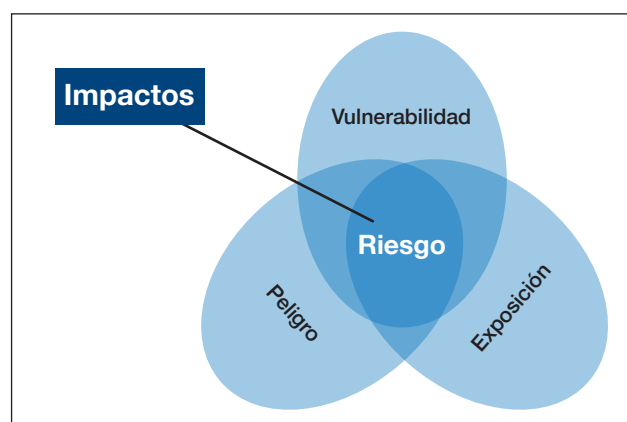
**Cuadro 2.** Comparación de los términos de vulnerabilidad al cambio climático en uso

**Definiciones de los términos utilizados en estas directrices** (reflejan el uso en la 4ª Evaluación del IPCC (2007) y por la comunidad conservacionista)



**Figura 2.** Diagrama esquemático de tres componentes de la vulnerabilidad en las EVCC. La mayor vulnerabilidad al cambio climático ocurre cuando las especies están expuestas a alteraciones grandes y/o rápidas de su entorno físico por el cambio climático, son sensibles a tales cambios, y tienen poca capacidad de adaptación (adaptado de Foden et al., 2013).

**Definiciones de los términos de acuerdo a la 5ª evaluación del IPCC (2014)**



**Figura 3.** El riesgo a impactos relacionados con el clima surge de la interacción de los peligros climáticos (incluyendo eventos y tendencias peligrosas) con la vulnerabilidad y la exposición a sistemas humanos y naturales (adaptado del IPCC, 2013).

Medidas globales de interés	
<b>Vulnerabilidad</b> La extensión en la que la biodiversidad es susceptible o incapaz de enfrentar los efectos negativos del cambio climático. Es una función del carácter, la magnitud y la tasa de cambio climático a las que está <b>expuesto</b> el sistema, su <b>sensibilidad</b> y su <b>capacidad de adaptación</b> (IPCC, 2007a) ( <i>Difiere del informe del IPCC, 2014</i> ).	<b>Riesgo</b> La probabilidad de sufrir consecuencias negativas por el cambio climático. Los riesgos resultan de la interacción de la <b>vulnerabilidad</b> , la <b>exposición</b> y el <b>peligro</b> . Muchas veces se representa el riesgo como la probabilidad de incidencia de eventos o tendencias peligrosas multiplicada por los impactos de su incidencia (IPCC, 2014) ( <i>no definida en 2007</i> ).  <b>Impacto</b> The effects, consequences or outcomes of climate change on natural and human systems. It is a function of the interactions between climate changes or hazardous climate events occurring within a specific time period and the vulnerability of an exposed society or system (IPCC, 2014). ( <i>Differs from IPCC, 2007, which describes impacts as potential or residual based on adaptation potential</i> ).
Factores contribuyentes intrínsecos	
<b>Sensibilidad</b> La sensibilidad es cuán afectado está un sistema, de manera negativa o positiva, por la variabilidad o el cambio climático. (IPCC, 2007a, 2014).  <b>Capacidad de adaptación</b> La capacidad o habilidad potencial de una especie, ecosistema o sistema humano de ajustarse al cambio climático a fin de moderar el daño potencial, aprovechar las oportunidades y responder a sus consecuencias (IPCC, 2007a, 2014).	<b>Vulnerabilidad</b> 'La tendencia o predisposición a ser afectado de manera negativa. En este uso, el término comprende diferentes conceptos, entre ellos, la <b>sensibilidad</b> al daño y la <b>falta de capacidad para enfrentar y ajustarse al cambio</b> ' (IPCC, 2014) ( <i>Difiere del informe del IPCC, 2007</i> ).  <b>Exposición</b> La <b>presencia</b> de personas, sustentos, especies o ecosistemas, funciones ambientales, servicios, y recursos, infraestructura o bienes económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían ser afectados negativamente (IPCC, 2014) ( <i>No se define en el informe del IPCC, 2007</i> ).
Factores contribuyentes externos	
<b>Exposición</b> Describe la naturaleza, magnitud y tasa de los cambios climáticos y ambientales experimentados por una especie (Dawson et al., 2011; Foden et al., 2013; Stein et al., 2014) ( <i>No se define en el informe del IPCC, 2007</i> ).	<b>Peligro</b> La incidencia potencial de un evento o tendencia física o sus impactos físicos, naturales o inducidos por la actividad humana, que puedan causar la pérdida de vida, lesión u otro impacto a la salud y/o la pérdida de propiedad, infraestructura, insumos, prestación de servicios, ecosistemas y recursos ambientales. En este informe, este término generalmente se refiere a los eventos o tendencias físicas climáticas o sus impactos físicos. (IPCC, 2014) ( <i>No se define en el informe del IPCC, 2007</i> ).

Consideramos la vulnerabilidad al cambio climático como el grado **en el que la biodiversidad será afectada negativamente por el cambio climático** (IPCC 2007; IPCC, 2014). Esta descripción es útil en términos conceptuales generales. Pero se necesita considerar, sin embargo, la definición de las variables claves de la vulnerabilidad una vez que se utiliza el término para propósitos más específicos como la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático (consulte la **Figura 2**). La vulnerabilidad al cambio climático puede describir **niveles o entidades de diferente jerarquía biológica** (p.ej., desde subpoblaciones hasta ecosistemas), a escalas espaciales diferentes (p.ej., desde lugares específicos hasta globalmente), considerando los diferentes tipos de impacto en la **biodiversidad** (p.ej., desde el riesgo a la extinción hasta la reducción de la función del ecosistema o la diversidad evolutiva), los diferentes **aspectos del cambio climático** (p.ej., desde impactos directos por el cambio climático hasta indirectos por la respuesta de los humanos y la biodiversidad al cambio climático) y cubriendo períodos considerablemente diferentes (p.ej., desde períodos de 5 años hasta de 100 años). Muchos estudios han fallado al definir explícitamente tales variables, lo que ha causado dificultades al interpretar y comparar los resultados. En el contexto específico de la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático, alentamos a los usuarios a definir explícitamente las variables claves de la

misma, a saber: la 'entidad' (DE), 'escala espacial' (EN), 'tipo de impacto' (A), 'causa' (POR) y 'período' (DURANTE) en el que se está considerando la vulnerabilidad (**Figura 4**).

La vulnerabilidad es una función de la naturaleza, la magnitud y tasa del cambio climático a las que está expuesta la especie o entidad (es decir, su exposición a **factores externos**) y su sensibilidad y capacidad de adaptación **intrínsecas**. Estos tres componentes de la vulnerabilidad: la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación, proporcionan un importante punto de partida para las evaluaciones de la vulnerabilidad al cambio climático. A pesar de que estos términos pueden ser utilizados ampliamente tanto en sistemas naturales, como humanos, los esquematizamos a continuación en el contexto de las especies, resaltando su relación con la vulnerabilidad al cambio climático en la **Figura 2**.

### Exposición

La exposición describe la naturaleza, magnitud y tasa del cambio climático al que está expuesto una especie o entidad, tanto con respecto a las variables climáticas directas (p.ej., temperatura, precipitación), como los factores asociados (p.ej., aumento del nivel del mar, frecuencia de las sequías y la acidificación del océano) (Stein et al., 2014). También incluye los cambios de los hábitats

y las regiones ocupadas por las especies (Dawson et al., 2011). Normalmente, las medidas de exposición climática futura son informadas a través de proyecciones derivadas de los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés).

### Sensibilidad

La sensibilidad es el grado en el que una especie, hábitat o ecosistema es o probablemente será afectado por o responderá ante los cambios (Glick et al., 2011). Esto depende de cuán acoplada se encuentra la especie a sus condiciones climáticas históricas, particularmente a las variables climáticas que se esperan que cambien en el futuro (Dawson et al., 2011).

La sensibilidad se mide a través de un intervalo de características que afectan la aptitud de los individuos y la recuperación de las poblaciones de una especie. Estas características incluyen las características fisiológicas, conductuales e históricas que influyen: el grado en el que las especies regulan su exposición a condiciones por debajo de los niveles óptimos; su habilidad para tolerar los cambios en las condiciones y señales climáticas, y en las interacciones interespecíficas y su habilidad para regenerarse y recuperarse después de los impactos. Las características también incluyen las respuestas plásticas en y a través de las generaciones y la variabilidad genética en las características que facilitan la regeneración y la recuperación.

### Capacidad de adaptación

La capacidad de adaptación describe el grado en el que una especie, hábitat o ecosistema puede disminuir o evitar los efectos negativos del cambio climático a través cambios en la distribución y colonización de áreas más adecuadas desde el punto de vista climático, y a través de respuestas ecológicas plásticas y/o respuestas evolutivas (Williams et al., 2008; Nicotra et al., 2015; Beever et al., 2016).

### Peligro

La magnitud de un evento físico relacionado al cambio climático, natural o inducido por los humanos, que puede afectar a una especie.

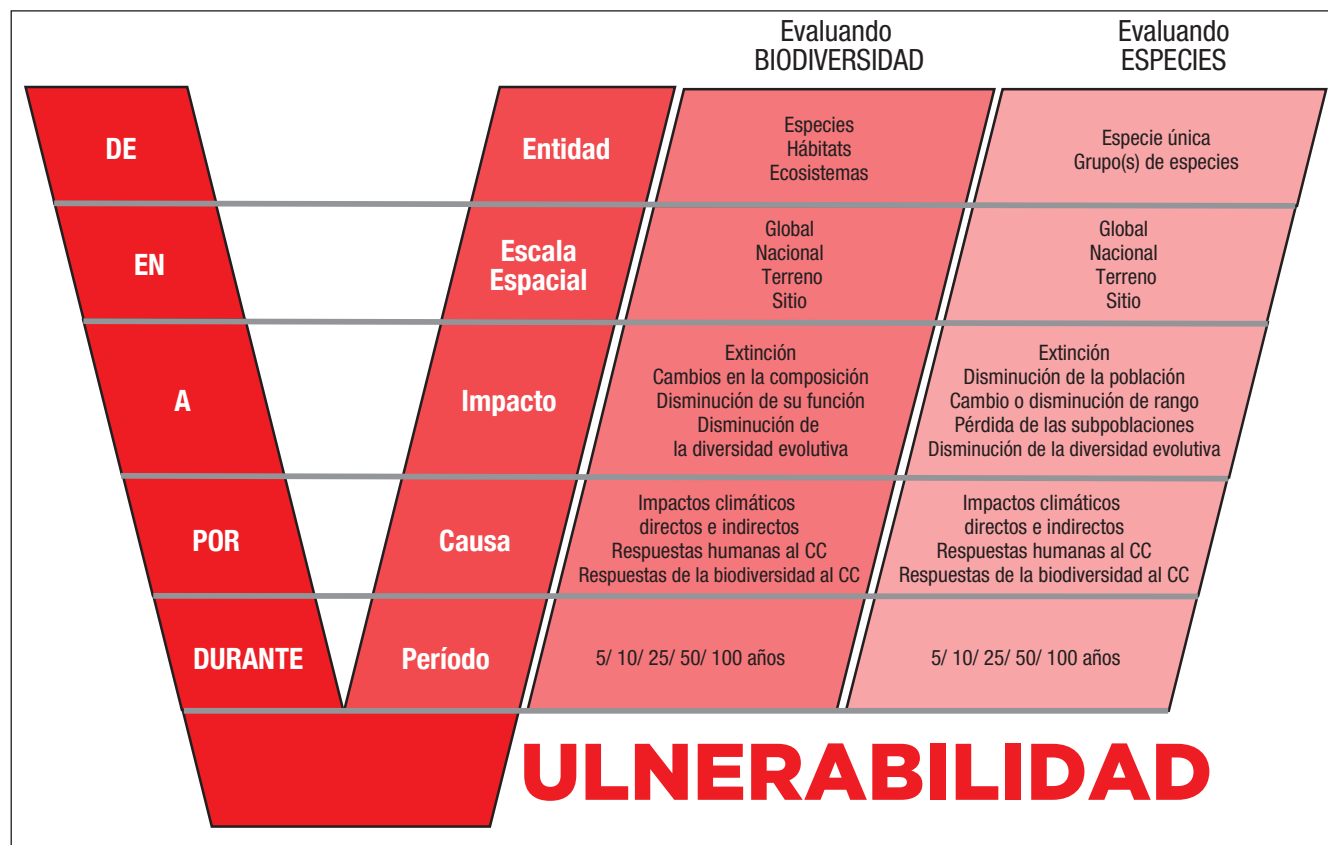
### Impacto

La pérdida o ganancia esperada u observada en las especies, hábitats o ecosistemas por un evento peligroso.

### Riesgo

Las consecuencias potenciales que tendrá el cambio climático futuro en las especies. Con frecuencia, el riesgo se representa como la probabilidad de incidencia de eventos o tendencias peligrosas multiplicada por los impactos que tendrán dichos eventos o tendencias en caso de que ocurran.

**Figura 4. Cinco parámetros claves para describir la vulnerabilidad de la biodiversidad al cambio climático.** Un ejemplo de un uso específico para la evaluación de un ecosistema es: “Vulnerabilidad DE los bosques templados EN América del Norte A la disminución del almacenamiento de carbono POR cambios en la temperatura y la precipitación y por daños producidos por los escarabajos de la corteza del pino DURANTE los próximos 50 años”. Un ejemplo del uso específico para la evaluación de la especie es: “Vulnerabilidad DE la especie de atún EN el Atlántico del sur A cambios de área de distribución y disminución de la población POR el aumento de las temperaturas del océano DURANTE los próximos 10 años”.



## 2.2 Enfoques de la evaluación de vulnerabilidad al cambio climático

Hablaremos sobre los enfoques que se utilizan comúnmente para realizar EVCC. Es importante comprender sus orígenes, principios, ventajas y límites tanto para los que necesitan aplicarlos, como para los que desean utilizar los resultados de EVCC generados por otros. Se pueden clasificar los métodos que se utilizan actualmente para evaluar las especies en tres enfoques principales: 1) el correlativo; 2) el mecanicista y 3) el basado en rasgos. Estos enfoques se resumen en la **Figura 5**, de acuerdo a una revisión de Pacifici et al. (2015), a la que el lector interesado debiera referirse para obtener más detalles y ejemplos. La figura incluye ejemplos de aplicación de cada enfoque y combinaciones de más de un enfoque.

### 2.2.1 Enfoques correlativos

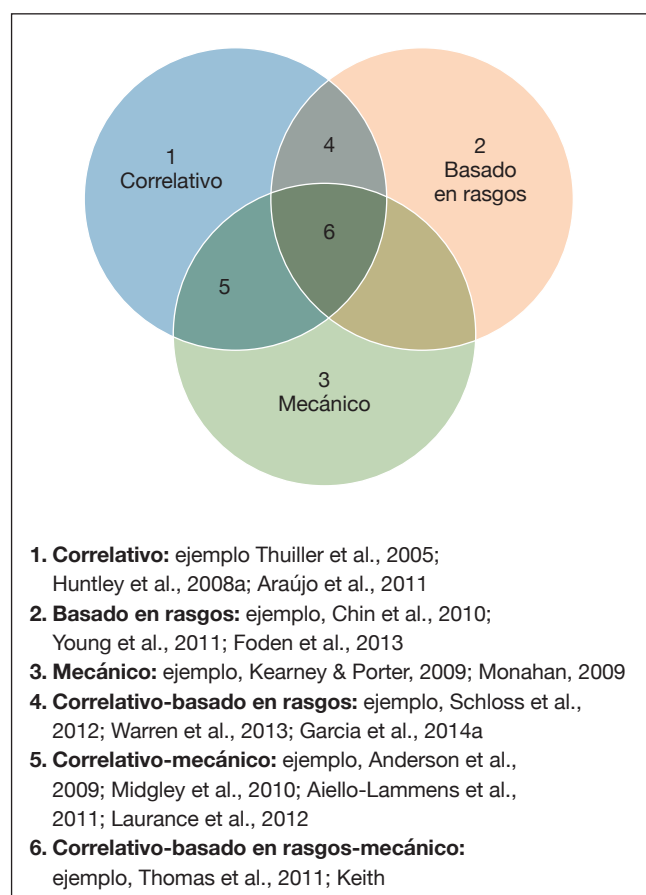
El uso de los modelos correlativos, también llamados modelos basados en nichos o de distribución de especies, para la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático comenzó a principio de la década de los noventa (p.ej., Busby, 1991; Walker & Cocks, 1991; Carpenter et al., 1993). Este enfoque utiliza las correlaciones entre la distribución de las especies y su clima histórico a fin de estimar sus requisitos climáticos, o nicho climático (p.ej., Hutchinson, 1957). A través de esta información y proyecciones sobre los climas futuros, los modelos predicen las posibles áreas geográficas que tendrán el clima adecuado para las especies en el futuro (p.ej., Pearson & Dawson, 2003; Beale et al., 2008). Es importante considerar si las especies podrán distribuirse y colonizar tales áreas y si las condiciones bióticas y abióticas son las adecuadas para ellas al interpretar si las posibles áreas adecuadas en el futuro pueden ser parte de las áreas de distribución futuras de las mismas. Normalmente, se infiere la vulnerabilidad de las especies al cambio climático a través de la diferencia prevista en el tamaño y lugar del área de distribución, y ocasionalmente a través de la magnitud de fragmentación (p.ej., Garcia et al., 2014b).

La suposición de los modelos correlativos de que las distribuciones de las especies están en equilibrio con sus climas es problemática, ya que esto ignora el impacto de las interacciones interespecíficas, los hábitats, las barreras geográficas, y los humanos y sus efectos sobre las distribuciones actuales (Guisan & Thuiller, 2005). Los enfoques correlativos no funcionan bien para las especies con distribución limitada (las cuales son normalmente las más amenazadas y de mayor preocupación para los biólogos de la conservación), esto ya que sus distribuciones tienen menos probabilidad de ser restringidas por presiones climáticas, y porque no se pueden cumplir los requisitos estadísticos de los modelos, esto es un número grande de registros de presencia espacial independientes (p.ej., Stockwell & Peterson, 2002; Platts et al., 2014). Los métodos correlativos normalmente ignoran los muchos mecanismos de impacto del cambio climático que van más allá del cambio de adecuación climática (p.ej., pérdida de recursos o especies mutualistas), los cuales se ha demostrado que son causas importantes de la disminución de poblaciones en respuesta al cambio climático (p.ej., Ockendon et al., 2014). Adicionalmente, tampoco consideran los rasgos biológicos que juegan un papel

importante en la sensibilidad y capacidad adaptativa de las especies al cambio climático (p.ej., Jiguet et al., 2007; Dawson et al., 2011). Para una discusión más extensa sobre las salvedades y limitaciones de los enfoques correlativos consultar Heikkinen et al. (2006), Araújo et al. (2012) y Franklin (2013).

A pesar de las mencionadas desventajas, los métodos correlativos funcionan bien para predecir cambios en los rangos de distribución de las especies en respuesta al cambio climático (p.ej., Chen et al., 2011; Dobrowski et al., 2011; Morelli et al., 2012; Smith et al., 2013) y cambios en la abundancia de la población (p.ej., Gregory et al., 2009). No requieren información biológica de las especies como dato de entrada, y obtienen resultados espacialmente explícitos que son informativos para la planificación espacial de la conservación (p.ej., Hannah et al., 2002; Araújo et al., 2004; Phillips et al., 2008; Araújo et al., 2011). Existen herramientas de interfaces de fácil uso como MaxEnt (p.ej., Phillips et al., 2004; Phillips & Dudi, 2008), BIOMOD (p.ej., Thuiller, 2003) y la Wallace Initiative (p.ej., Warren et al., 2013), que permiten la aplicación de varios métodos correlativos. También pueden ser utilizados para evaluar los impactos del cambio climático en las especies de las redes de sitios identificados para la conservación de especies particulares, como las áreas protegidas o las Áreas Claves para la Biodiversidad, a través de la proyección de modelos de distribución de especies en los climas particulares de cada sitio de una red (p.ej., Hole et al., 2009; Bagchi et al., 2013).

**Figura 5. Resumen de los tres enfoques principales de EVCC (1–3), las seis categorías que pueden crear sus combinaciones y ejemplos publicados de su uso.**





El **Apéndice Tabla A** proporciona un resumen sobre los tipos de métodos correlativos disponibles para la EVCC, ejemplos de su uso y las herramientas disponibles para su aplicación. Pearson (2007) proporciona una referencia excelente y de fácil acceso para comprender y utilizar los métodos correlativos; incluyendo los utilizados para la EVCC.

## 2.2.2 Enfoques basados en rasgos

Los enfoques de evaluación de la vulnerabilidad basados en rasgos (TVA, por sus siglas en inglés) utilizan las características biológicas de las especies para estimar su sensibilidad y capacidad de adaptación al cambio climático, normalmente combinando estas con estimados de la extensión de su exposición al cambio climático (p.ej., Williams et al. 2008, Young et al. 2012, Foden et al. 2013a, Smith et al. 2016). Estos métodos requieren datos biológicos y, normalmente, información de distribución a amplia escala (p.ej., un mapa de área de distribución). Se necesita tener conocimiento biológico del grupo taxonómico focal para parametrizar cómo y en que medida las características individuales se relacionan con la vulnerabilidad al cambio climático, y para evaluar cada especie de acuerdo a si presentan estas características. Se puede estimar la exposición utilizando modelos basados en SIG (p.ej., Foden et al., 2013), interfaces de fácil uso que presentan proyecciones climáticas generales (p.ej., <http://www.climatewizard.org/>), cualquier número de programas o lenguajes estadísticos (p.ej., R, Python, MatLAB) o el juicio de expertos (p.ej., Chin et al., 2010). En ocasiones se omiten las evaluaciones de exposición cuando no se tiene información sobre la distribución de las especies o cuando solo se requieren evaluaciones simples o preliminares (p.ej., McNamara, 2010; Advani, 2014). Luego se combinan los puntajes de sensibilidad, capacidad adaptativa y, preferiblemente, los de exposición para asignar una categoría de vulnerabilidad a las especies. El **Apéndice Tabla B** proporciona un resumen de los tipos de métodos basados en rasgos disponibles para la EVCC, ejemplos de su uso, y las herramientas disponibles para su aplicación.

Los enfoques basados en características son utilizados principalmente para informar la priorización de las especies para las intervenciones de conservación. Dado que no pueden predecir el espacio climático futuro adecuado para las especies no son muy útiles para la planificación de la conservación espacial. Además, rara vez se conocen los umbrales precisos de vulnerabilidad de cada rasgo, por lo que se necesita estimar o seleccionar valores relativos arbitrarios (p.ej. Foden et al., 2013; García et al., 2014a). Existe poco consenso sobre los enfoques para combinar los puntajes de los rasgos para evaluar la exposición, sensibilidad o capacidad adaptativa ni para combinarlos a fin de obtener puntajes generales de EVCC, y muchos métodos simplemente los consideran por igual (p.ej., Laidre et al., 2008; Foden et al., 2013) a pesar de que algunas características son probablemente más importantes que otras para la determinación de la vulnerabilidad al cambio climático (p.ej., Pacifici et al., 2015). Dado que muchas características tienden a ser específicas del grupo taxonómico, la mayoría de los métodos no permiten realizar una comparación directa de vulnerabilidad entre los mismos.



David Bickford con una serpiente *Fordonia* de manglar (*Fordonia leucobalia*). Esta especie se encuentra exclusivamente en manglares y son vulnerables a las inundaciones cuando los niveles del mar aumentan más rápido de lo que pueden soportar. Muchas otras especies también se verán afectadas. © David Bickford.

A pesar de que los TVA fueron uno de los primeros enfoques propuestos (p.ej., Herman & Scott, 1994), han ganado importancia recientemente (p.ej., Williams et al., 2008; Graham et al., 2011; Young et al., 2015) por lo que aún no están validados. Sin embargo, está aumentando su uso entre organizaciones de conservación y agencias de gestión ambiental (p.ej., Bagne et al., 2011; Glick et al., 2011; Carr et al., 2013; Foden et al., 2013; Johnson, 2014; Young et al., 2015; Hare et al., 2016), ya que permiten una evaluación relativamente rápida de vulnerabilidad de múltiples especies, no es complicado utilizar el modelo (p.ej., Pacifici et al., 2015), y porque la participación de expertos y sus métodos de fácil comprensión y aplicación facilitan su simple adquisición y uso. Además, permiten considerar muchos mecanismos de impacto del cambio climático en las especies y la consideración de sus rasgos biológicos cumple con la necesidad de considerar las respuestas individuales de las especies al cambio climático. Finalmente, se pueden aplicar a todas las especies sin importar el tamaño de su distribución y esto, junto con que no demandan información muy detallada de la distribución de las especies, permiten su amplia aplicación a grupos taxonómicos completos, por lo que son particularmente útiles para las evaluaciones de conservación a amplia escala.

## 2.2.3 Enfoques mecanicistas

Los modelos mecánicos o basados en procesos, predicen las respuestas probables de las especies ante los cambios de las condiciones ambientales incorporando explícitamente procesos, umbrales e interacciones biológicas conocidas (p.ej., Morin & Thuiller, 2009). Los modelos mecanicistas de nicho utilizan cálculos de las tolerancias fisiológicas de las especies generalmente tomados de observaciones realizadas en laboratorios y en el campo (p.ej., Jenouvrier et al., 2009; Radchuk et al., 2013; Overgaard et al., 2014) o de ecuaciones de equilibrio energético (p.ej., Molnár et al., 2010; Huey et al., 2012), para calcular los parámetros del nicho. Estos cálculos suministran datos aproximados del nicho potencial o fundamental de la especie evitando la desventaja de los enfoques correlativos que consideran que las especies se encuentran en equilibrio con su entorno.

Los modelos mecanicistas incluyen un amplio intervalo de mecanismos de impacto del cambio climático, incluyendo cambios en la disponibilidad de recursos (p.ej., Hoffmann et al., 2010), el uso de los suelos (p.ej., Mantyka-Pringle et al., 2014; Martin et al., 2015), depredación, competencia (p.ej., Urban et al., 2012), tormentas (p.ej., Crozier et al., 2008) y cambios en la adecuación de los hábitats (p.ej., Hunter et al., 2010; Aiello-Lammens et al., 2011; Forrest et al., 2012). También pueden incluir características específicas de las especies como las distancias de dispersión (p.ej., Kearney et al., 2008; Keith et al., 2008), longevidad, fecundidad (p.ej., Saltz et al., 2006), dependencia de densidad (p.ej., Leroux et al., 2013), factores morfológicos, evolución genética, plasticidad fenotípica (p.ej., Chevin et al., 2010; Huey et al., 2012) y estocasticidad demográfica (p.ej., Hunter et al., 2010); y pueden incluir interacciones entre los mecanismos como el cambio del uso de los suelos y el cambio climático (Mantyka-Pringle et al., 2014, 2016). Otros modelos mecanicistas consideran los cambios en la distribución de la vegetación y las dinámicas, utilizando grupos de especies (como tipos funcionales de plantas), de acuerdo a los parámetros bioclimáticos y fisiológicos (p.ej., Morin & Thuiller, 2009). El **Apéndice Tabla C** proporciona un resumen de los tipos de métodos mecanicistas disponibles para la EVCC, ejemplos de su uso y las herramientas disponibles para su aplicación.

Las ventajas claves de estos modelos son, entre otras, su capacidad de informar una comprensión mecanicista de los procesos que impulsan la vulnerabilidad al cambio climático (Kearney & Porter, 2009), el proporcionar una manera bien fundada de predecir las respuestas a situaciones nuevas (como extrapolar en vez de interpolar) y que son la base para identificar las implicaciones de las respuestas a fin de planificar acciones de gestión (p.ej., Fordham et al., 2013a; Mantyka-Pringle et al., 2016). Por otro lado, incluyen un intervalo de mecanismos de impacto al cambio climático, consideran las características biológicas individuales de las especies y pueden ser aplicados a especies con distribución limitada. Sin embargo, los métodos mecanicistas son muy “hambrientos” de datos y requieren gran cantidad de conocimiento básico y datos fisiológicos, demográficos, y de distribución de las especies (Morin & Thuiller, 2009), y por lo tanto sus costos son relativamente altos (Kearney & Porter, 2009; Chevin et al., 2010), lo que representa una importante limitación para su aplicación que, hoy en día, se limita a solo algunas especies.

## 2.2.4 Enfoques combinados

Los enfoques anteriores son los más comúnmente utilizados en las evaluaciones de vulnerabilidad. Sin embargo, cada vez aumenta más el consenso de que al combinar los enfoques se pueden obtener modelos que incluyan los beneficios de todos. A continuación discutimos brevemente las combinaciones de enfoques que han sido aplicadas hasta ahora, resaltando que, hasta donde sabemos, aún no se han publicado estudios sobre los enfoques combinados entre los basados en rasgos y los mecanicistas. El **Apéndice Tabla D** proporciona un resumen de los tipos de métodos de enfoques combinados disponibles para la EVCC, ejemplos de sus usos, y las herramientas disponibles para su aplicación.

### Enfoques correlativos-TVA

Normalmente, los enfoques correlativos y los basados en rasgos se combinan de dos maneras. En la primera, se utilizan los rasgos para crear modelos correlativos más realistas desde el punto de vista biológico, y los datos como las distancias de dispersión, las duraciones de las generaciones y las preferencias de hábitats para perfeccionar los cálculos de exposición de las especies y/o las dinámicas de áreas de distribución. Schloss et al., (2012), por ejemplo, usó la longitud de dispersión natal y la generacional para predecir la distribución futura de los mamíferos terrestres en el hemisferio occidental, bajo cambios climáticos y de uso de los suelos; y Warren et al., (2013) ha aplicado un enfoque similar para identificar las especies y las regiones en las que los modelos correlativos pueden predecir la vulnerabilidad al cambio climático (p.ej., García et al., 2014a). En el segundo enfoque, se pueden incluir los resultados del modelo correlativo en enfoques basados en rasgos para respaldar las medidas generales de vulnerabilidad (p.ej., Young et al., 2012). Al integrar la exposición calculada con los modelos correlativos, los índices de los TVA obtienen cálculos más confiables de los riesgos del cambio climático tanto por factores intrínsecos como por los extrínsecos (Willis et al., 2015).

### Enfoques correlativos-mecanicistas

Se pueden utilizar los resultados de los modelos correlativos para proyectar el espacio climático adecuado de una especie durante varios períodos en el futuro, mientras que los modelos mecanicistas proyectan los impactos de la adecuación de los hábitats y las dinámicas poblacionales que resultan de estos cambios en el espacio geográfico (Keith et al., 2008; Anderson et al., 2009; Midgley et al., 2010; Aiello-Lammens et al., 2011). Algunos estudios han integrado las características históricas en los modelos a fin de obtener proyecciones más precisas sobre las respuestas de las especies al cambio climático (por ejemplo, Midgley et al., 2010) mientras otros también han incluido las interacciones entre las especies (por ejemplo, Harris et al., 2012; Fordham et al., 2013).

### Métodos basados en los criterios: un enfoque combinado correlativo-mecanicista

Thomas et al. (2010) utilizó combinaciones de los cambios observados en las especies (como disminuciones registradas en las poblaciones), los cambios proyectados (potencialmente de modelos correlativos y/o mecanicistas) y características de la historia de vida de las especies (como la duración de las generaciones) para calcular la vulnerabilidad al cambio climático de un grupo de especies del Reino Unido. Al igual que en la Lista Roja de UICN, se combinaron varias fuentes de información a través de un sistema basado en criterios que clasifica las especies en categorías de vulnerabilidad de acuerdo a umbrales cuantitativos. Estos métodos basados en criterios consideran varios factores que afectan el riesgo relativo de extinción de una especie (como la disminución en la extensión de incidencia o la reducción del tamaño de la población) y se pueden ajustar a especies con distinta disponibilidad de datos.

Los criterios que predicen la vulnerabilidad al cambio climático pueden superponerse a los utilizados en las evaluaciones de las

Listas Rojas de UICN. Pearson et al. (2014) encontró que las características que predisponen una selección de herpetofauna norteamericana a la vulnerabilidad al cambio climático también se encuentran incluidas en la información recolectada para evaluar el riesgo de extinción de la especie a través de las categorías y criterios de las Listas Rojas de UICN. En estudios relacionados, Pearson et al. (2014), Stanton et al. (2015) y Keith et al. (2014) demostraron que la categoría de riesgo de extinción de las Listas Rojas de UICN predice bien la vulnerabilidad al cambio climático de seis grupos de reptiles y salamandras norteamericanas y para una especie de rana australiana. Akçakaya et al., (2014) concluyen que estos estudios sugieren que las evaluaciones para las Listas Rojas de UICN, si se actualizan con la frecuencia necesaria, reflejan el riesgo de extinción por vulnerabilidad al cambio climático y pueden proporcionar información con décadas de anticipación a la extinción de una especie. Se deben realizar, sin embargo, investigaciones adicionales para profundizar el enfoque en otros grupos taxonómicos. Para esto, es fundamental que no se alteren los umbrales y períodos utilizados en los criterios (Akçakaya et al., 2006) y que se cumplan las directrices de UICN (Subcomité de Normas y Peticiones de la UICN, 2014) para que las evaluaciones de las Listas Rojas de UICN proporcionen resultados que puedan ser comparables entre los grupos taxonómicos.

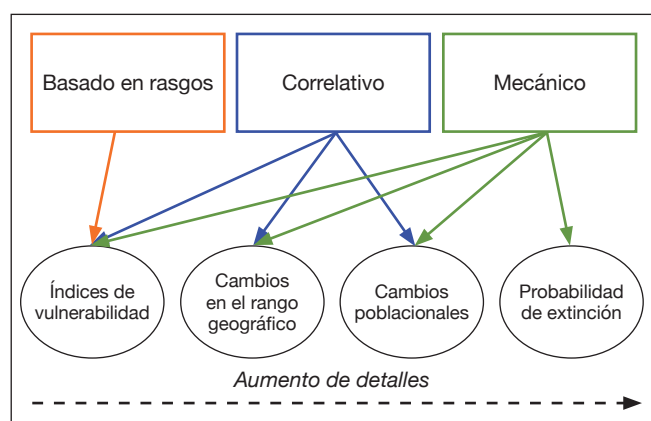
## 2.3 Medidas para calcular la vulnerabilidad al cambio climático

Los tres enfoques producen medidas diferentes para la vulnerabilidad al cambio climático tal como se muestra en la **Figura 6**. Estas se discuten en Pacifici et al. (2015) y se resaltan a continuación.

### 2.3.1 Índices de vulnerabilidad y otros sistemas de calificación relacionados

Se pueden obtener índices de vulnerabilidad de los resultados de todos los enfoques, al integrar diferentes indicadores y medidas. Pueden ser resultados directos (como los que se obtienen en la mayoría de los enfoques basados en rasgos y criterios) o se pueden desarrollar clasificando cualquiera de las otras medidas

**Figura 6. Las cuatro medidas principales o tipos de información que resultan de una EVCC y los enfoques que las producen.** Las medidas aumentan en detalle de izquierda a derecha.



cuantitativas de vulnerabilidad (a saber, cambios de área de distribución o de población o las probabilidades de extinción) en, por ejemplo, categorías de vulnerabilidad alta, media y baja. A pesar de que normalmente estas medidas no tienen unidades, combinan diferentes tipos de información y son muchas veces subjetivas, se pueden comunicar fácilmente a los encargados de la toma de decisiones de alto nivel y al público no especializado.

### 2.3.2 Cambios de área de distribución

Predicciones de los cambios en los espacios climáticos adecuados para una especie se pueden obtener a través de los modelos correlativos y los mecanicistas de nicho y se utilizan para inferir los cambios potenciales de distribución de acuerdo a la adecuación climática de las especies focales en un terreno o en uno o más lugares. Al interpretar y utilizar las medidas se debe considerar la habilidad de la especie para dispersarse, colonizar y sobrevivir en nuevas áreas climáticas adecuadas, ya que incluirlas explícitamente puede ocasionar predicciones más sólidas. Normalmente, las medidas de cambio de distribución incluyen el cambio del tamaño del área de distribución general, el que se calcula restando el tamaño potencial del área de distribución futuro del tamaño actual, y sumando el área de distribución potencial futuro ganado (Thuiller et al., 2011; Schloss et al., 2012), la superposición (y distancia potencial) entre las áreas de distribución actuales y los futuros y la frecuencia con la que se espera que el espacio climático de la especie cambie en el espacio geográfico.

### 2.3.3 Cambio en las poblaciones

Apartir de los cambios que se proyectan que ocurrirán en el hábitat adecuado para una especie, se pueden inferir los cambios en la población, con frecuencia en un contexto espacial detallado, los cuales se calculan a través de los modelos correlativos y mecanicistas (Nenzén & Araújo, 2011). Sin embargo, se debe considerar que las especies pueden estar distribuidas de manera irregular dentro de sus áreas de distribución, por lo que la relación entre la pérdida de hábitat proyectada y el cambio de área de distribución puede que no sea lineal. También se pueden proyectar los cambios de población explícitamente al utilizar tendencias pasadas, información climática, y otros datos relevantes, como entrada para los modelos mecanicistas (Jenouvrier et al., 2009; Regehr et al., 2010) y estimar la sensibilidad a los cambios en los parámetros de los modelos (p.ej., los patrones de distribución, la historia de vida). Normalmente se combinan las proyecciones de diferentes escenarios para calcular la magnitud de la disminución proyectada.

### 2.3.4 Probabilidades de extinción

Se pueden obtener las probabilidades de extinción de los modelos mecanicistas (Hunter et al., 2010; Thompson et al., 2012), los evolutivos (Vedder et al., 2013) o de los análisis de viabilidad poblacional (AVP) cuando se conocen las características de la historia de vida de las poblaciones (Maschinski et al., 2006; Jenouvrier et al., 2009). Normalmente se asocian las tasas vitales de la población con los cambios de los parámetros ambientales (p.ej., temperatura, precipitación, niveles de CO<sub>2</sub>) para calcular las probabilidades de extinción en un período dado.



La espada plateada Haleakalā (*Argyroxiphium sandwicense* subsp. *macrocephalum*) crece en los volcanes de las islas de Hawái. Luego de haber sobrevivido a su casi extinción por el pastoreo y la depredación humana, ahora se enfrenta a la disminución de la pluviometría por el cambio climático y el aumento de temperaturas que afectan la capa de inversión de las montañas, reduciendo la humedad. © Paul Krushelnycky





# 3. Estableciendo las metas y objetivos de la evaluación de vulnerabilidad al cambio climático

Bruce E. Young, Tara Martin, James Watson, Wendy B. Foden, Stephen Williams, y Brett Scheffers

## 3.1 Definiendo la meta

El tener metas claras facilita establecer objetivos bien estructurados y promover resultados claros y verificables en las EVCC y generar impactos efectivos de conservación. El tener claridad respecto de cuáles son los resultados necesarios antes de iniciar la investigación, nos ayudará a garantizar: i) que los resultados del análisis satisfarán las necesidades; ii) que las evaluaciones no tendrán que ser repetidas pronto; iii) que se puede completar el proyecto en un tiempo razonable sin exceso en los costos, y iv) que los resultados influenciarán al público destinatario. Reiteramos la importancia de distinguir entre la EVCC (lo que describe este documento) y la planificación de adaptación (que no es el enfoque de este documento) al establecer las metas. Las evaluaciones de vulnerabilidad al cambio climático se realizan para ayudar a identificar lo que se encuentra en riesgo y por qué, mientras que la planificación de adaptación al cambio climático, la cual utiliza información de las EVCC, se enfoca en cómo responder a estos riesgos.

Una meta bien definida responde las siguientes preguntas:

1. ¿Por qué realiza esta EVCC?
2. ¿Quiénes son sus destinatarios?
3. ¿Cuáles decisiones espera influenciar con los resultados?

### 3.1.1 ¿Por qué realiza usted esta EVCC?

Comience respondiendo esta pregunta básica. Conocer, de manera general, los logros anticipados de la evaluación de vulnerabilidad le guiará a responder las otras preguntas sobre la audiencia y las decisiones a influenciar, así como los objetivos específicos que definirán el proyecto. Ejemplos de las metas que puede tener para su EVCC son:

- Determinar el grado de vulnerabilidad al cambio climático de una o más especies en una región particular o en todos sus áreas de distribución.
- Realizar un ejercicio académico.
- Proporcionar información sobre un proceso de planificación de adaptación específico (diseñado para abordar una sola especie, un grupo de especies, un área geográfica o algo más) que ya esté en práctica o que ha sido planificado.
- Obtener información cuantitativa sobre la respuesta de una especie al cambio climático para ser utilizada en un modelo demográfico.
- Utilizar la evaluación de vulnerabilidad como medio para aprender más sobre cómo el cambio climático puede influenciar las especies de interés o un grupo particular de personas.

Sin importar cuál sea la meta, responder esta pregunta básica del por qué le ayudará a abordar las siguientes, las cuales a su vez le guiarán al elegir una metodología apropiada para su evaluación.

### 3.1.2 ¿Cuál es su audiencia?

Las evaluaciones de vulnerabilidad pueden estar dirigidas a una o más audiencias, incluyendo a los encargados de crear las políticas, administradores de terrenos/recursos, científicos o el público en general. Las audiencias pueden tener diferentes objetivos y procesos de gestión y toma de decisiones, y estas diferencias pueden afectar los aspectos específicos de la evaluación de vulnerabilidad incluyendo la elección de los métodos, el nivel de rigor necesario, los estilos de comunicación y los objetivos de la evaluación en sí. Por ejemplo, el lenguaje utilizado para informar al público será menos técnico que el utilizado para informar a la comunidad científica. De manera similar, los administradores de recursos y los encargados de crear las políticas requerirán la información en un lenguaje que sea directamente pertinente al contexto (p.ej., biológico, legislativo) en el que trabajan.

### 3.1.3 ¿Cuáles decisiones espera influenciar con los resultados?

Es fundamental entender la manera en que la audiencia de una evaluación participa en los procesos de planificación y gestión a fin de desarrollar los objetivos de la evaluación de vulnerabilidad. Existe mayor probabilidad de que los resultados de una evaluación tengan un impacto si se corresponden a las necesidades de gestión de sus destinatarios. Por ejemplo, a nivel local, los administradores pueden desarrollar planes de conservación para la planificación, implementación y monitoreo de acciones de gestión en un solo sitio. En contraste, las agencias gubernamentales, como una agencia de parques nacionales, pueden desarrollar planes de gestión para una red de lugares. Un gobierno subnacional puede estar interesado en priorizar las especies que se encuentran en su jurisdicción para considerar su gestión. Cada caso requiere un proceso de gestión diferente y todos necesitan evaluaciones de vulnerabilidad con objetivos diferentes.

## 3.2 Definiendo sus objetivos

Los objetivos describen los pasos de acción específicos que son necesarios para lograr su meta de EVCC. Describimos seis categorías amplias de objetivos utilizadas en las EVCC.

**Identificar** para grupos taxonómicos, regiones y períodos específicos:

- **Cuáles** especies son las más vulnerables.
- **Cuán** vulnerables son las especies (a saber, la magnitud de la vulnerabilidad).
- **Por qué** las especies son vulnerables.
- **Dónde** son vulnerables las especies.
- **Cuándo** se vuelven vulnerables las especies.
- **Qué falta** (a saber, cuáles datos e información se necesitan para realizar una buena EVCC)

La escala es una consideración fundamental en las ciencias ecológicas y de conservación (Levin, 1992). Los patrones existen a diferentes niveles de organización en un amplio intervalo de escalas taxonómicas, espaciales y temporales. Es fundamental que se identifiquen las escalas apropiadas de enfoque de una EVCC y definir los objetivos en términos de cada una a fin de establecer objetivos claros y efectivos ya que estos influenciarán directamente los enfoques, métodos y recursos que se utilizarán para abordarlos.

### 3.2.1 Seleccionando un enfoque taxonómico

Se pueden realizar EVCC a nivel de especies, subespecies, metapoblaciones, poblaciones o individuos; también a niveles taxonómicos mayores (p.ej., Géneros) o para especies de grupos taxonómicos múltiples (p.ej., todas las especies vertebradas de un área particular o que pertenecen a un grupo o gremio funcional específico). Sin embargo, la mayoría de las evaluaciones se enfocan a nivel de especie, o menor, dado que estas entidades tienden, aunque no siempre, a tener características biológicas relativamente consistentes (a saber, tolerancias climáticas y habilidades de dispersión). Alentamos a los usuarios a, siempre que sea posible, utilizar los sistemas de clasificación taxonómica aceptados (p.ej., las directrices y referencias taxonómicas de la Lista Roja de UICN<sup>1</sup>) a fin de maximizar la aplicabilidad y comparabilidad de los resultados.

A continuación, presentamos una lista indicativa a fin de ayudar a los usuarios a establecer objetivos claramente definidos (**Tabla 1**). La **Tabla 2** proporciona ejemplos de los objetivos agrupados de acuerdo a su enfoque taxonómico, su extensión espacial y sus categorías de objetivos.

### 3.2.2 Seleccionar un enfoque espacial

El enfoque espacial de una evaluación puede de área de distribución taxonómico (p.ej., la distribución completa de una especie, subespecie o subpoblación), un sitio (p.ej., un área protegida individual o área discreta que contenga una subpoblación de una especie como un Área Clave para la Biodiversidad (KBA, por sus siglas en inglés) o una red de sitios, una unidad política o administrativa como un estado o nación o una escala espacial más grande (incluyendo áreas terrestres o marinas, región, continente o hasta el mundo entero). Algunos enfoques y métodos de EVCC tienen requisitos específicos para establecer el enfoque espacial por lo que se incluye una discusión más detallada sobre la selección de la extensión focal de la EVCC en la Sección 5.1.1 (Extensión y resolución espacial).

**Tabla 1.** Lista indicativa para identificar objetivos claros y cuantitativos.

i) Seleccionar una categoría de objetivo:					
¿Cuál?	¿Cuán?	¿Por qué?	¿Dónde?	¿Cuándo?	¿Qué falta?
ii) Seleccionar un enfoque taxonómico (por ejemplo):					
Población	Especie	Un grupo taxonómico	Grupos taxonómicos múltiples		
iii) Seleccionar un enfoque espacial:					
Área de distribución del taxón	Rango del taxón	Red de sitios	Escala espacial más grandes		
iv) eleccionar un período de tiempo (por ejemplo):					
100 años	50 años	20 años	5 años	Presente	

### 3.2.3 Seleccionando un período de tiempo

Los períodos de evaluación son la mayoría de las veces establecidos por usuarios que tienen intereses o necesidades específicas (como un horizonte de planificación de 10 años para un gerente de un sitio), junto con las siguientes consideraciones importantes. Para realizar evaluaciones con enfoque taxonómico se deben considerar las duraciones generacionales de las especies. Los intervalos de proyección más cortos son apropiados para las especies con períodos de vida más cortos (p.ej., según las directrices de la Lista Roja de UICN, tres generaciones, pero con un mínimo de 10 años); mientras que para las especies con períodos de vida más largos, se deben considerar intervalos de proyección más largos para considerar la vulnerabilidad adecuadamente (p.ej., tres generaciones pero a un máximo de 100 años).

Una rana *Rhacophorus angulirostris* del Monte Kinabalu, Borneo. Estas ranas necesitan ríos de montaña limpios y de corrientes rápidas para reproducirse por lo que cualquier cambio en las precipitaciones estacionales puede afectar considerablemente su éxito reproductivo. Las montañas se están volviendo más secas y calurosas y una sequía prolongada puede tener efectos desastrosos para esta y muchas otras especies de anfibios. © David Bickford.



**Tabla 2.** Ejemplos heurísticos de los objetivos EVCC, agrupados de acuerdo a las seis categorías de objetivos y su alcance de enfoque. Identificar, para grupos taxonómicos, regiones y períodos específicos:

Enfoque <b>taxonómico</b>	
¿Cuál?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles especies (p.ej., aves, anfibio, plantas) son más y menos vulnerables al cambio climático en sus áreas de distribución globales de distribución?</li> <li>• ¿Cuáles organismos (p.ej., peces marinos, dispersores de semillas del bosque pluvial y animales migratorios) son más y menos vulnerables al cambio climático?</li> <li>• ¿Cuál población de especies amenazadas es más y menos vulnerable al cambio climático?</li> </ul>
¿Cuánto?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuánta es la probabilidad de que el espacio climático adecuado de la especie focal se contraiga o expanda en los siguientes 10/25/50/100 años?</li> <li>• ¿Cuánto y con cuánta rapidez deberán moverse las especies para seguir su espacio climático en el año 2050?</li> </ul>
¿Por qué?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles mecanismos de impacto enfrentarán las especies?</li> <li>• ¿Las especies son sensibles, están expuestas y/o tienen poca capacidad de adaptación al cambio climático directo/indirecto?</li> <li>• ¿Cuáles componentes del cambio climático representan el mayor riesgo para las especies focales (p.ej., temperaturas máximas vs. disponibilidad de agua en la temporada de sequía, aumento de eventos discretos vs. eventos continuos a largo plazo)?</li> </ul>
¿Dónde?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles áreas serán adecuadas, desde el punto de vista climático, para las especies focales en 10/25/50 años?</li> <li>• ¿Cuáles regiones o países tienen especies con mayor vulnerabilidad al cambio climático?</li> <li>• ¿Las especies más vulnerables al cambio climático se encuentran en áreas de mayor vulnerabilidad al cambio climático para los humanos?</li> </ul>
¿Cuándo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿El cambio climático afectará a las especies en los próximos 10 años?</li> <li>• ¿Cuándo ya no será adecuado el clima de una sección específica del área de distribución de la especie?</li> </ul>
¿Qué falta?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles son las imprecisiones claves que requieren recolectar datos adicionales y/o investigación adicional para evaluar mejor la vulnerabilidad al cambio climático de las especies?</li> </ul>
Enfoque <b>espacial</b> de diferentes especies en un solo sitio	
¿Cuál?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles de las especies que existen actualmente en un área protegida son más y menos vulnerables al cambio climático?</li> <li>• ¿Para cuáles de las especies existentes el lugar permanecerá o será adecuado climáticamente en 10/25/50 años?</li> <li>• ¿Para cuáles especies aún inexistentes el lugar será adecuado en 10/25/50 años?</li> </ul>
¿Cuánto?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuál es la tasa de cambio predicha (es decir, pérdida y ganancia) de las especies en el sitio para el año 2050?</li> </ul>
¿Por qué?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles aspectos de la vulnerabilidad (es decir, sensibilidad, exposición y/o capacidad deficiente de adaptación) son los más comunes para las especies del lugar?</li> <li>• ¿Cuáles aspectos del cambio climático proyectado tienen la función más preponderante de riesgo para las especies del lugar?</li> <li>• ¿Cuáles características biológicas de las especies del lugar aumentan y/o reducen su resiliencia o capacidad de adaptación?</li> </ul>
¿Dónde?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles áreas del sitio se espera que cambien menos y puedan servir de refugio para las especies?</li> <li>• ¿Las áreas circundantes del sitio podrán ser utilizadas como corredores o puentes para las especies con áreas de distribución cambiantes?</li> </ul>
¿Cuándo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuándo el lugar dejará de ser adecuado climáticamente para sus especies emblemáticas?</li> <li>• ¿El lugar continuará siendo adecuado para las especies focales en 10/25/50 años?</li> </ul>
¿Qué falta?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles son las incertidumbres claves que requieren la recolección de datos y/o la investigación para evaluar mejor la vulnerabilidad al cambio climático de las especies del sitio?</li> </ul>
Enfoque <b>espacial</b> sobre especies diferentes en una red de lugares o a una escala espacial más grande	
¿Cuál?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles de las áreas protegidas de la región/país actualmente contienen la mayor y menor cantidad de especies vulnerables al cambio climático?</li> <li>• ¿Cuáles lugares tienen mayor y menor probabilidad de que las especies sufran cambios por el cambio climático?</li> <li>• ¿En cuáles lugares se proyecta que los climas locales permanezcan adecuados para las especies existentes actualmente?</li> <li>• ¿Cuáles especies inexistentes actualmente pueden potencialmente colonizar el área dado que el clima será adecuado en el futuro?</li> <li>• ¿Para cuáles sitios y especies es más importante mejorar la conectividad entre los sitios?</li> </ul>
¿Cuánto?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuánto aumentará el riesgo de extinción por cambio climático de las especies focales para el año 2030?</li> <li>• ¿Cuántas especies perderán todo el espacio climático adecuado en la red de lugares?</li> <li>• ¿Cuántas distribuciones futuras de las especies focales se encuentran en la red actual de áreas protegidas?</li> </ul>
¿Por qué?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles aspectos del cambio climático proyectado juegan la función más importante de producción de vulnerabilidad al cambio climático en el terreno?</li> <li>• ¿Cuáles aspectos de la vulnerabilidad (es decir, sensibilidad, exposición y/o capacidad deficiente de adaptación) son más comunes para las especies?</li> <li>• ¿Cuántas y cuáles especies enfrentan obstáculos intrínsecos y extrínsecos para seguir su espacio climático adecuado?</li> </ul>
¿Dónde?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Dónde el clima será adecuado para las especies existentes en la red o región en 10/25/50 años?</li> <li>• ¿Dónde existen lugares de refugio potencial y/o corredores para las especies que cambiarán su área de distribución?</li> <li>• ¿Cuáles son las áreas más importantes a añadir en la red de conservación?</li> </ul>
¿Cuándo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuándo ocurrirán los mayores cambios en la composición de especies en la red de áreas protegidas?</li> <li>• ¿Cuándo una especie tiene probabilidad de perder todas las condiciones climáticas adecuadas en la red?</li> </ul>
¿Qué falta?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cuáles datos y/o investigaciones tienen mayor prioridad para la mejor evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de las especies en la red?</li> </ul>



Mientras más adelante en el futuro sea la proyección climática la incertidumbre será considerablemente mayor, por lo que el intervalo de resultados factibles aumentan en períodos muy largos (p.ej., >50 años). Sin embargo, la seguridad al proyectar si una especie es vulnerable probablemente aumentará con el tiempo para muchas especies. Dado que las proyecciones se calculan en promedio, las de períodos más cortos (p.ej., <20 años) son más propensas a sesgos por valores extremos. Por ejemplo, en las últimas

proyecciones del IPCC (2013) se reflejaron intervalos de 20 años, a saber, 2016-35 (2025 promedio); 2046-65 (2055 promedio) y 2081-2100 (2090 promedio). A pesar de que los modelos nos permiten obtener resultados detallados y recolectar proyecciones para períodos personalizados, se necesita un procesamiento considerable y una experticia apropiada. Sin embargo, utilizar los promedios que ya se encuentran disponibles limita los períodos que se pueden considerar al realizar la EVCC.



Los koalas (*Phascolarctos cinereus*) solo se alimentan de una especie de eucalipto y eligen aquellas hojas con menos tanino y más proteínas. Al aumentar los niveles de CO<sub>2</sub> aumentan los niveles de tanino y disminuyen los de proteína lo que disminuye el valor nutricional de las hojas. Además, durante los periodos muy calientes y secos los koalas bajan de los árboles en búsqueda de agua, lo que los pone en mayor riesgo ante los depredadores. © Flickr - Erik K. Veland

# 4. Seleccionando y evaluando los enfoques y métodos para las EVCC

Wendy B. Foden, Raquel A. Garcia, Philip Platts, Jamie Carr, Ary Hoffmann, y Piero Visconti

## 4.1 Pasos para seleccionar su enfoque y métodos para la EVCC

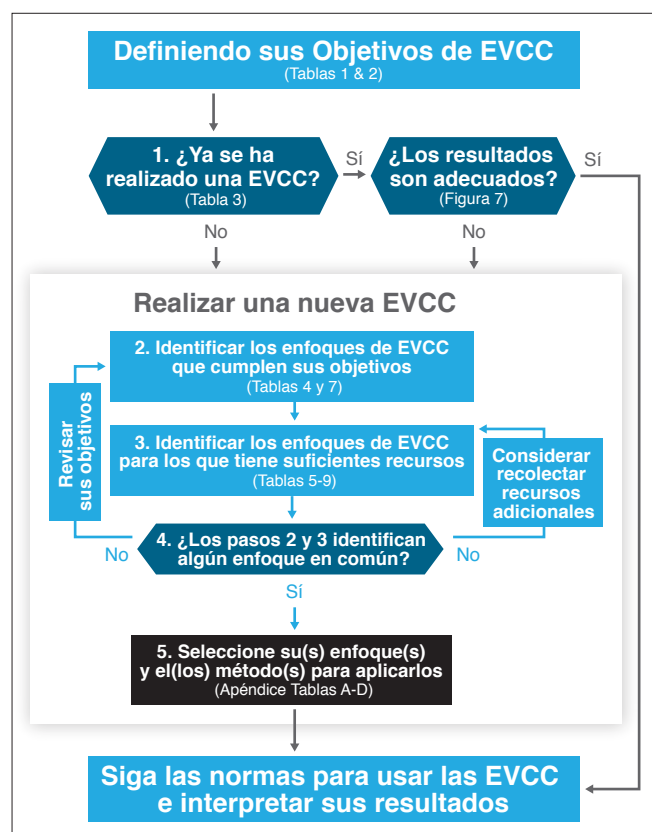
Luego del paso esencial de establecer metas y objetivos claros para la EVCC, se deben considerar diferentes aspectos asociados a cómo proceder para obtener los resultados necesarios para cumplir tales metas y objetivos. Esta sección identifica los aspectos a considerar y brinda los pasos para guiar sistemáticamente a los usuarios con las decisiones pertinentes (Consulte la **Figura 7**).

### Paso 1. Identificar y evaluar las EVCC existentes

Muchos estudios de EVCC se han realizado hasta la fecha y muchos de ellos han sido publicados en literatura académica y relacionada con la gestión, y también en línea. Antes de iniciar una EVCC, recomendamos investigar la literatura existente para establecer si su especie focal, lugar o región ya ha sido evaluada, si las evaluaciones son de fácil acceso y si sirven para su propósito. Aun cuando no sean adecuadas para su propósito, estas evaluaciones pueden proporcionar información sobre datos y experiencias desconocidas y sobre cómo se enfrentaron los obstáculos específicos de la región o contexto. La **Tabla 3** enumera ejemplos de evaluaciones de EVCC que se encuentran generalmente disponibles gratuitamente. En

casos de estudios en los que solo existen disponibles de manera pública las síntesis de alto nivel de los resultados (p.ej., por género u otras categorías taxonómicas o funcionales distintas del nivel de especies), recomendamos contactar a los autores para solicitar el acceso a los resultados y datos a nivel de especies. En este sentido, alentamos a los evaluadores a proporcionar acceso público a sus resultados y, de ser posible, datos en formatos útiles para que puedan ser utilizados en otras EVCC.

Este paso tiene el propósito de evaluar la adecuación y rigurosidad de las EVCC para los que necesitan utilizar los resultados para la planificación de la conservación y más ampliamente, por ejemplo, durante la revisión de pares. Describimos diferentes preguntas guías importantes (consulte la **Figura 8**) y dado que muchas se superponen con los pasos necesarios para desarrollar e interpretar las EVCC, referimos a los usuarios a esas secciones. El primer paso importante es identificar los objetivos de los autores de la EVCC, los cuales pueden ser establecidos explícitamente, implícitamente o muchas veces pueden ser difíciles de determinar. Se recomienda clasificarlos de acuerdo a las seis categorías descritas en la Sección 3.2 (Definiendo sus objetivos) y especificar el enfoque taxonómico y regional y el período de tiempo considerado, ya que todos deben ser aplicables.



**Figura 7. Pasos conceptuales para una EVCC de especies,** incluyendo el establecimiento de objetivos, la identificación y evaluación de evaluaciones existentes y la realización de nuevas EVCC y la interpretación de sus resultados. Los recursos incluyen los datos, el tiempo y la experiencia.

**Tabla 3.** Ejemplos de estudios de EVCC y/o resultados a nivel de especies de acceso público que pueden ser útiles para cumplir los objetivos de los usuarios

Alcance de EVCC	Descripción	Referencia
Aves africanas	Mapas de los áreas de distribución proyectadas de especies para los años 2025, 2055 y 2085, (enfoque correlativo)	BirdLife International y la Universidad de Durham: <a href="http://www.africa-climate-exchange.org/maps/">http://www.africa-climate-exchange.org/maps/</a>
Aves, anfibios y corales de arrecife de aguas cálidas globales	Calificaciones de vulnerabilidad para cada especie (con alta/baja vulnerabilidad); mapas de las áreas de alta concentración de especies con alta vulnerabilidad (enfoque basado en rasgos).	(Foden et al., 2013). Calificaciones disponibles en los apéndices de: <a href="http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0065427">http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0065427</a> ; los datos de los rasgos pueden ser solicitados a UICN.
Mamíferos, reptiles, peces de agua dulce y algunas plantas africanas del área de Albertine Rift	Calificaciones de vulnerabilidad para cada especie (con alta/baja vulnerabilidad); mapas de las áreas de alta concentración de especies con alta vulnerabilidad (enfoque basado en rasgos)	(Carr et al., 2013). Calificaciones disponibles en los apéndices: <a href="http://www.traffic.org/non-traffic/SSC-OP-048.pdf">http://www.traffic.org/non-traffic/SSC-OP-048.pdf</a>
Aves australianas	Clasificaciones de las sensibilidades y las capacidades de adaptación de las especies (basado en rasgos) y mapas de la exposición proyectada (correlativo)	(Garnett et al., 2013) <a href="http://www.nccarf.edu.au/sites/default/files/attached_files_publications/Garnett_2013_Climate_change_adaptation_strategies_for_Australian_birds.pdf">http://www.nccarf.edu.au/sites/default/files/attached_files_publications/Garnett_2013_Climate_change_adaptation_strategies_for_Australian_birds.pdf</a>
Mamíferos árticos y subárticos	Calificaciones de vulnerabilidad (basado en rasgos)	(Laidre et al., 2008) <a href="http://www.esajournals.org/doi/pdf/10.1890/06-0546.1">http://www.esajournals.org/doi/pdf/10.1890/06-0546.1</a>
Aves europeas	Conteos detallados de las especies y mapas de las áreas de distribución actuales y proyectadas de las especies (finales del siglo XXI) (enfoque correlativo)	(Huntley et al., 2007) <a href="http://www.lynxeds.com/product/climatic-atlas-european-breeding-birds">http://www.lynxeds.com/product/climatic-atlas-european-breeding-birds</a>

Si los objetivos del estudio respaldan la(s) meta(s) de los usuarios, el siguiente paso es garantizar los enfoques metodológicos apropiados que hayan sido utilizados (es decir, enfoques correlativos, basados en rasgos, mecanísticos, o combinado). Este y los siguientes pasos para garantizar los métodos específicos utilizados para aplicar los enfoques sean apropiados son descritos en los Pasos 2-5 que se presentan a continuación. Los usuarios deben entonces explorar si estos han sido aplicados con responsabilidad, lo que incluye evaluar los datos de las especies, los datos climáticos, las variables bioclimáticas y las escalas espaciales y temporales utilizadas (Sección 5 (Uso de las EVCC y la interpretación de sus Resultados)). Luego, los usuarios deben considerar cómo el estudio manejó la incertidumbre, incluyendo la de los datos de especies y climáticos, y las características inherentes de los enfoques y métodos seleccionados (Sección 6. (Entender y Trabajar con la Incertidumbre)). Finalmente, a pesar de que ha sido poco común hasta la fecha, algunos autores de las EVCC evalúan o validan sus evaluaciones según los cambios observados en las especies, incluyendo los cambios en la población (p.ej., Foden et al., 2007; Gregory et al., 2009; Sinervo et al., 2010) o cambios de área de distribución (p.ej., Mitikka et al., 2007; Tingley et al., 2009, 2012). La validación puede aumentar claramente la confianza hacia los resultados originales (consultar la Sección 6.7 (Validación de las EVCC)). En el caso más común de resultados no validados, los usuarios pueden desear examinar los datos poblacionales y cualquier cambio observado en las áreas de distribución para establecer si estos datos respaldan o contradicen las evaluaciones.

Estos pasos tienen el propósito de suministrar una guía general para ayudar a los usuarios a evaluar la pertinencia de uso de las EVCC existentes. Reconocemos el valor y el ahorro de recursos que aportan a la comunidad de los profesionales de la conservación las evaluaciones de EVCC sólidas y listas para su uso, por lo que alentamos a los que realizan EVCC a proporcionar acceso público a sus datos, métodos y resultados.

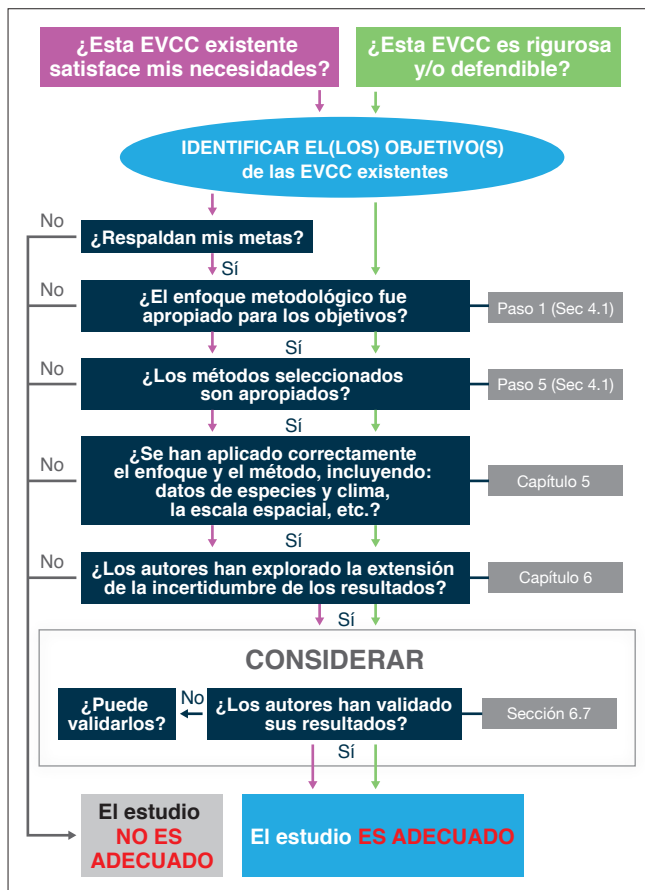
## Paso 2. Identifique enfoques de EVCC que cumplan con sus objetivos

En caso de que no hayan estudios que cumplan con sus objetivos, el siguiente paso sería entonces diseñar su propia EVCC. Con los objetivos claramente establecidos podrá determinar los enfoques de EVCC con los que puede obtener los resultados que necesita para cumplirlos. Describimos los tipos de información o medidas que producen cada uno de los enfoques principales de EVCC en la Sección 2.3 (Medidas para calcular la vulnerabilidad al cambio climático) la **Figura 6** y los analizamos en este apartado. La **Tabla 4**

Los pingüinos emperadores (*Aptenodytes forsteri*) viven la mayoría de sus vidas en el hielo marítimo de la Antártida. La disminución del hielo marítimo por el aumento de temperaturas ya ha sido registrado y con tendencia a continuar, amenazando su hábitat. La disminución del hielo marítimo también se relaciona con la disminución de las poblaciones de los camarones antárticos, lo que tendrá consecuencias negativas en todas las especies que se encuentran más arriba en la cadena alimenticia, entre ellas, los pingüinos emperadores. © Antarctic Legacy of South Africa







**Figura 8. Pasos para evaluar la pertinencia de los estudios de EVCC existentes para ser utilizados en la planificación de adaptación o para su publicación durante la revisión por pares.**

proporciona ejemplos de objetivos de EVCC (por tipo) y los enfoques que se pueden utilizar para cumplirlos. En esta etapa, se deben considerar todos los enfoques aplicables posibles ya que la evaluación siguiente de los recursos de entrada (Paso 3) puede imposibilitar el uso de algunos enfoques y se debe considerar el uso de enfoques múltiples y combinados cuando sea posible (se discutirá con más detalle en el Paso 5).

Resumiendo, los modelos mecanicistas bien calibrados de suficiente complejidad (es decir, que simulan todos los procesos biológicos y ecológicos pertinentes) probablemente proporcionan la respuesta más sólida a las preguntas anteriores, dado que relajan todos los supuestos de los modelos correlativos a la vez que mantienen el rigor y la objetividad de los modelos estadísticos de datos (Fordham et al., 2013b, pero consulte Buckley, 2010; Olson & Jönsson, 2014). En caso de que no existan suficientes datos empíricos para establecer un modelo mecanicista, los investigadores pueden completar los vacíos a través de la indagación a expertos (Martin et al., 2012; Mantyka-Princgle et al., 2014; Martin et al., 2015). En otros casos en los que no hayan datos suficientes, comprensión ecológica ni habilidades para elaborar los modelos, los usuarios podrán notar que los enfoques correlativos ofrecen información apropiada para cumplir los objetivos en los casos en los que se requiere información espacial y temporal explícita y donde exista la posibilidad de que el cambio de la idoneidad climática sea un generador directo de vulnerabilidad. Los enfoques basados en rasgos serán los más apropiados para casos en los que los objetivos a nivel de especies no requieran información espacial explícita y en los que sea importante considerar un amplio intervalo de mecanismos de impacto del cambio climático (p.ej., cambio de las

interacciones entre las especies, alteraciones en factores climáticos desencadenantes). En muchos casos, se pueden utilizar enfoques múltiples o combinados y aprovechar las fortalezas de los enfoques incluidos (consulte el Paso 5 para obtener más información).

### Paso 3. Identificar los enfoques de EVCC para los que tiene suficientes recursos

Los enfoques de EVCC y los métodos utilizados para aplicarlos difieren en gran medida en los recursos que necesitan, por lo que la guía que suministramos en este documento debe ser considerada general. Sin embargo, de manera muy general, los enfoques mecanicistas tienden a ser los enfoques que más demandan recursos, mientras que los más simples basados en rasgos y los correlativos facilitados a través de herramientas, son los que menos demandan recursos. En la **Tabla 5** resaltamos los recursos que con frecuencia se necesitan y/o se desean al aplicar cada uno de los tres enfoques principales de EVCC, analizando la distribución de las especies, los datos de rasgos y moleculares, los datos ecológicos, información sobre los impactos del cambio climático que se manifiestan indirectamente a través de los humanos, los requisitos de experiencia y los requisitos tecnológicos finales. A continuación hablamos brevemente sobre cada uno de estos requisitos en el contexto de este paso, utilizando la terminología y las descripciones más simples y claras posibles. Encontrará información más detallada y rigurosa sobre la selección de los datos de entrada más adelante, en la Sección 5.1. (Selección y uso de los datos de entrada). También resaltamos ejemplos de recursos gratuitos de utilidad para los usuarios (**Tabla 6**). Los usuarios pueden utilizar la **Tabla 5** para registrar o resaltar cada tipo de

**Tabla 4. Categorías de los objetivos de las EVCC, ejemplos de los resultados necesarios para lograrlos y los enfoques potencialmente capaces de obtenerlos.** Consideramos que también se pueden aplicar los enfoques combinados de EVCC para lograr los ejemplos especificados. Normalmente, la pertinencia de cada tipo de combinación (*consulte el Apéndice Tabla D*) para lograr los objetivos depende de la de los enfoques específicos incluidos.

Categorías de los objetivos de EVCC (De la Tabla 1)	Ejemplos de los resultados de EVCC necesarios para lograr los objetivos	Enfoques de EVCC		
		Correlativo	Rasgos	Mecánico
¿Cuál?	Clasificaciones de la vulnerabilidad de las especies	Sí	Sí	Sí
	Clasificaciones de la vulnerabilidad o probabilidades de extinción de las subpoblaciones	Sí		Sí
	Clasificaciones del potencial invasivo de las especies	Sí	Sí	Sí
¿Cuánto?	Probabilidades de extinción de las especies y/o poblaciones			Sí
	Cálculos de los cambios de área de distribución / cambio en el espacio climático adecuado (magnitud, distancia, tasa)	Sí		Sí
	Potencial de dispersión		Sí	Sí
¿Por qué?	Susceptibilidad intrínseca al cambio climático (es decir, sensibilidad y/o capacidad adaptativa)		Sí	Sí
	Identidad de impulsores climáticos de vulnerabilidad	Sí		Sí
	Identidad de impulsores biológicos de vulnerabilidad		Sí	Sí
¿Dónde?	Ubicación de las áreas con mayores concentraciones de las especies más o menos vulnerables	Sí	Sí	Sí
	Ubicación de las áreas adecuadas o inadecuadas desde el punto de vista climático para las especies en el futuro	Sí		Sí
	Ubicación de los corredores y/o refugios potenciales	Sí		Sí
	Subpoblaciones que se encuentran fuera de los climas adecuados proyectados	Sí		Sí
	Ubicación de las áreas más afectadas por impulsores específicos de vulnerabilidad, incluyendo la alteración de las interacciones interespecíficas y las respuestas humanas al cambio climático		Sí	Sí
¿Cuándo?	Período del riesgo proyectado para las especies, sitios y paisajes	Sí		Sí
	Tasa de cambio del espacio climático	Sí		Sí
	Tasa de cambio potencial de las especies/subpoblaciones	Sí		Sí
¿Qué falta?	Vacíos e incertidumbres clave – climáticas	Sí	Sí	Sí
	Vacíos e incertidumbres clave – biológicas		Sí	Sí
	Vacíos e incertidumbres clave – en nuestra comprensión de los impactos y sus mecanismos impulsores	Sí	Sí	Sí
	Vacíos e incertidumbres clave – respuestas humanas al cambio climático como impulsor de la vulnerabilidad <sup>#</sup>	Sí	Sí	Sí
	Especies de las que se necesita más información para realizar la EVCC			

<sup>#</sup>Esta es un área activa de investigación: cada enfoque puede informar al menos algunos aspectos de cómo las respuestas humanas pueden impulsar la vulnerabilidad.

recurso y requisito de información evaluados a fin de considerar dónde se encuentran sus fortalezas y carencias de recursos y facilitar el cumplimiento de este paso. Incluimos una fila al final de la tabla para que registre sus posibles conclusiones. Finalmente, notamos que durante la evaluación de los datos de especies los usuarios pueden encontrar que su especie focal es **poco conocida, de área de distribución pequeña o reducida** (consulte el Cuadro 3), en cuyo caso los usuarios deben consultar la Sección 4.2 (Enfoques para tres situaciones difíciles de EVCC: especies poco conocidas, de área de distribución pequeña o reducida).

#### Datos de área de distribución de las especies

El área de distribución de las especies se encuentra normalmente de tres formas. Las localidades representan un conjunto de datos que indican los lugares en donde se han encontrado las especies. Se pueden recolectar a través de observaciones directas en el campo

(en atlas, encuestas o programas de ciencia ciudadana) o como referencias espaciales asociadas a la recolección de muestras que se realiza en museos o herbarios. Se puede tener acceso a estas y otras fuentes de datos de distribución a través de portales o bases de datos como el Centro Mundial de Información sobre la Biodiversidad (GBIF, por sus siglas en inglés). Los datos malla (o “datos ráster”) se basan en la presencia y/o ausencia de una especie en cuadrículas mapeadas de diferente tamaño. Los polígonos de área de distribución normalmente representan las extensiones máximas conocidas de las distribuciones de las especies, ya sea de manera global o dentro de una unidad geográfica más pequeña. Si sabe o sospecha que su especie focal es una especie poco conocida o con área de distribución reducida, consulte el Cuadro 3 y la Sección 4.2 (Enfoques para tres situaciones difíciles de EVCC: especies poco conocidas, de área de distribución pequeña y reducida).



**Tabla 5. Resumen de los recursos de datos generalmente requeridos por cada enfoque de EVCC.** Consideramos que se presentan generalizaciones amplias y que dentro de cada enfoque algunos métodos varían, desde necesitar más recursos hasta ser de fácil uso. Las fuentes públicas de datos cumplen algunas de las necesidades descritas.

Tipo de recurso	Requisitos de entrada	Correlativo	Basado en rasgos	Mecánico
Datos de distribución de especies*	Puntos de localidades y/o	Se puede utilizar	Se puede utilizar	Se puede utilizar
	Distribuciones malla/raster; y/o	<b>Requerido</b>	Se puede utilizar	<b>Generalmente requerido</b>
	Polígonos/mapas	Se puede utilizar (menos recomendable)	<b>Generalmente requerido</b>	Se puede utilizar (menos recomendable)
Datos de rasgos de las especies*	Rasgos demográficos y/o morfológicos y/o conductuales y/o ecológicos	No se utiliza	<b>Requerido</b>	<b>Requerido</b>
	Rasgos fisiológicos (p.ej., tolerancias térmicas, requisitos energéticos)	No se utiliza	Se puede utilizar	<b>Requerido por algunos métodos</b>
Datos moleculares		Se puede utilizar	Se puede utilizar	Se puede utilizar
Datos climáticos	Proyecciones de pasado distante o paleoclimáticas	Se puede utilizar	Se puede utilizar	Se puede utilizar
	Proyecciones climáticas de pasado reciente/referencia	<b>Requerido</b>	<b>Generalmente requerido</b>	<b>Requerido</b>
	Proyecciones futuras	<b>Requerido</b>	<b>Generalmente requerido</b>	<b>Requerido</b>
Datos ecológicos	Proyecciones espaciales de la corteza terrestre (que reflejan ecosistema/hábitat).	Se puede utilizar	Se puede utilizar	Se puede utilizar
	Proyecciones espaciales de procesos ecológicos (p.ej., incendios, hidrología, elevación del nivel del mar)	Se puede utilizar	Se puede utilizar	Se puede utilizar
	Datos que describen la exacerbación de otras amenazas (no causadas por el cambio climático)	Se puede utilizar	Se puede utilizar	Se puede utilizar
Impactos indirectos	Datos que describen las respuestas humanas al cambio climático	No se utiliza generalmente	Se puede utilizar	Se puede utilizar
	Datos que describen las interacciones del cambio climático con otras amenazas	No se utiliza generalmente	Se puede utilizar	Se puede utilizar
Experticia	¿Existen herramientas y/o interfaces de fácil uso disponibles?	Para algunos métodos	Para algunos métodos	Para algunos métodos
	Elaboración de modelos de distribución de las especies (asumiendo que no se utiliza ninguna herramienta)	<b>Requerido</b>	No se utiliza	No se utiliza
	Sistemas de información geográfica (asumiendo que no se utiliza ninguna herramienta)	<b>Requerido</b>	<b>Generalmente requerido</b>	<b>Requerido</b>
	Biología de las especies	No se utiliza	<b>Requerido</b>	<b>Requerido</b>
	Proyecciones climáticas y escenarios globales	<b>Requerido</b>	<b>Generalmente requerido</b>	<b>Requerido</b>
Requisitos tecnológicos	Hardware (p.ej., computadora)	<b>Requerido</b>	<b>Generalmente requerido</b>	<b>Requerido</b>
	Software (adicional a un sistema operativo y una aplicación de hoja de cálculo)	Con frecuencia se requiere software de GIS	Con frecuencia se requiere software de GIS	Con frecuencia se requiere software de GIS
<b>¿Los recursos que tiene disponible cumplen con los requisitos?*</b>		<b>S/N/Quizás</b>	<b>S/N/Quizás</b>	<b>S/N/Quizás</b>

\*IMPORTANTE: Si sabe o sospecha que su especie focal puede incluir o incluye una especie **poco conocida, área de distribución pequeña o reducida** consulte el **Cuadro 3** y la Sección 4.2 (Enfoques para tres situaciones difíciles de EVCC).

### Cuadro 3. Tipos de especies que representan desafíos para la realización de EVCC

Consideramos tres tipos de especies focales que representan desafíos particulares para la realización de EVCC y en la Sección 4.2 discutimos los enfoques para realizarlas.

1. **Las especies poco conocidas** son aquellas para las que existen pocos datos disponibles por poco muestreo de sus distribuciones o poco conocimiento de su biología. Esto quizás se deba a falta de fondos, falta de acceso a los hábitats de estas especies, bajas densidades en sus área de distribución o baja detectabilidad de otras maneras. La poca disponibilidad de datos es un desafío serio para la realización de EVCC con cualquier enfoque convencional y es particularmente grave en las regiones tropicales (Feeley & Silman, 2011), las cuales también son las que normalmente presentan mayor diversidad (Gaston, 2000).
2. **Las especies de área de distribución pequeña** puede o puede que no sean comunes localmente pero existen solo en un área pequeña debido, por ejemplo, a alta especialización climática (Ohlemuller et al., 2008), requisitos no climáticos específicos (Damschen et al., 2010), competencia con otras especies o aislamiento geográfico (p.ej., en islas). Las especies de área de distribución pequeña pueden ser evaluadas potencialmente utilizando los enfoques basados en rasgos y mecánicos, pero no se pueden utilizar los métodos correlativos si las cantidades de registros de incidencia se encuentran por debajo de los umbrales recomendados (consulte la Sección 4.2 para obtener más detalles).
3. **Las especies de área de distribución reducida** tienen áreas existentes considerablemente más pequeños que los conocidos en la historia reciente (nominalmente después de 1750; pueden ser apropiados períodos más largos o cortos dependiendo de la especie); esta disminución pudo haber cesado o no. Para propósitos de esta discusión, solo consideramos los casos en los que las reducciones no hayan sido causadas por el cambio climático antropogénico. Las especies de área de distribución reducida generalmente pueden ser evaluadas utilizando enfoques basados en rasgos y mecánicos, siempre que estén disponibles los datos requeridos y los enfoques mencionados cumplan con los objetivos de EVCC de los evaluadores (consulte la Sección 4.2; Tablas 4-5). Sin embargo, estas especies representan un gran desafío para los enfoques correlativos porque el área de distribución existente probablemente no refleja la amplitud total del nicho ambiental de la especie. En los casos en los que las área de distribución han disminuido tanto que la especie solo existe en un área pequeña, los desafíos son los mismos establecidos para las especies de área de distribución pequeña.

La **Tabla 6** presenta ejemplos de las fuentes de información de la distribución de las especies. La Lista Roja de Especies Amenazadas de UICN es el archivo más grande de polígonos de área de distribución; también existen otras fuentes disponibles como guías de campo, planes de acción y artículos especializados. Es importante considerar que tanto los de área de distribución como los datos malla pueden incluir áreas en las que no existan las especies focales (p.ej., cuando una especie se encuentra alrededor de una montaña pero no en ella, el mapa normalmente incluirá la montaña) por lo que representan los límites de las distribuciones de las especies y no las áreas de ocupación. Dependiendo del propósito de uso, podría ser conveniente modificar los datos, por ejemplo, eliminando los datos de hábitats inadecuados o elevaciones que excluyen a la especie en cuestión (p.ej., Boitani et al., 2007; Beresford et al., 2011).

### Datos de rasgos de las especies

Los rasgos **demográficos** incluyen información como los períodos de generación, los resultados reproductivos y la longevidad, mientras que los **morfológicos** se relacionan con los tamaños y las formas de los organismos. La información de muchas de estos rasgos particulares de las especies se ha reunido de colecciones ex situ (p.ej., zoológicos y jardines botánicos). Las bases de datos que contienen esta información incluyen, entre otras, Utheria ([www.utheria.org](http://www.utheria.org)) y el Sistema de Gestión de Información Zoológica (Zoological Information Management System, ZIMS; [www.isis.org](http://www.isis.org)). Sin embargo, se debe reconocer que los individuos ex situ no siempre reflejan los rasgos que presentan en su vida salvaje con precisión (p.ej., las especies pueden vivir mucho más en cautiverio). Los rasgos **conductuales** incluyen, entre otros, los hábitos migratorios, reproductivos y de dispersión; y los **ecológicos** suministran información sobre las interacciones de las especies con sus entornos e incluyen sus necesidades de hábitat, interacciones con otras especies y dependencia a desencadenantes ambientales.

Con frecuencia, los rasgos de importancia para las EVCC difieren entre los grupos taxonómicos. En el caso de los corales, por ejemplo, los tipos de simbiosis algal de la especie son importantes para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático, mientras que para las plantas acuáticas es clave la resistencia a la salinidad. Las fuentes de información de rasgos incluyen bases de datos en línea (consulte la **Tabla 6**), literatura formal y gris, guías de campo, el Servicio de Información de Especies (SIS, por sus siglas en inglés) de UICN y el conocimiento de los expertos. En casos en los que no existan datos específicos disponibles, se pueden inferir los rasgos utilizando la información de taxones relacionados u otras características (p.ej., la capacidad de dispersión y el grupo del que se alimentan utilizando las características morfológicas) (revise Hespeneide (1973)) lo que representa un fuente de información muy útil en el caso de especies poco conocidas.

Los datos de los rasgos fisiológicos como la resistencia térmica y las necesidades energéticas pueden ser muy útiles para las evaluaciones de vulnerabilidad al cambio climático ya que permiten realizar predicciones de área de distribución mucho más sólidas (Kearney & Porter, 2009). Sin embargo, estos datos se encuentran entre los más difíciles de encontrar. Las principales fuentes de este tipo de información son los experimentos de laboratorio y los registros de especies realizados ex situ, pero también se pueden encontrar estudios de las respuestas fisiológicas in situ en documentos de literatura formal y gris. Al igual que en el caso de los datos demográficos, los datos fisiológicos tienden a limitarse a algunas especies bien estudiadas y se debe tener precaución al extrapolar datos de registros ex situ. Las características fisiológicas son útiles en los enfoques basados en rasgos y también se pueden utilizar en los enfoques correlativos-mecánicos.

**Tabla 6. Ejemplos de recursos de datos disponibles para la realización de EVCC** (adaptado de Pearson, 2010). Los ejemplos enumerados tienden a centrarse en escalas globales y continentales pero también existen disponibles muchos recursos a escalas regionales y nacionales.

**Ejemplos de recursos de datos públicos para la realización de EVCC**

<b>Datos de especies</b>		
Datos de distribución de localidades	Global Biodiversity Information Facility (GBIF): datos de puntos disponibles para especies ~1,5m a nivel global (se deben 'limpiar' los datos antes de utilizarlo, p.ej., consulte Chapman, 2005)	<a href="http://www.gbif.org">www.gbif.org</a>
	Atlas de aves finlandesas	<a href="http://atlas3.lintuatlas.fi/background/copyrights">http://atlas3.lintuatlas.fi/background/copyrights</a>
Datos malla de distribución	Datos del atlas de aves surafricanas	<a href="http://sabap2.adu.org.za/index.php">http://sabap2.adu.org.za/index.php</a>
	Datos del atlas de ranas surafricanas	<a href="http://adu.org.za/frog_atlas.php">http://adu.org.za/frog_atlas.php</a>
Polígonos/mapas de distribución	Base de datos de la Lista Roja de UICN (Sistema de Información de Especies): polígonos disponibles para ~50.000 especies a nivel global, incluyendo todos los mamíferos, aves, anfibios, peces cartilaginosos y corales	<a href="https://www.iucnredlist.org/resources/spatial-data-download">https://www.iucnredlist.org/resources/spatial-data-download</a>
	NatureServe: polígonos disponibles para los mamíferos del hemisferio oeste, peces y especies incluidas en listas y amenazadas de los EE. UU.	<a href="http://www.NatureServe.org">www.NatureServe.org</a>
	BirdLife: polígonos disponibles para todas las especies de aves del mundo (>10.000)	<a href="http://www.birdlife.org/datazone/info/spcdownload">www.birdlife.org/datazone/info/spcdownload</a>
Datos de rasgos de especies	Base de datos de la Lista Roja de UICN (Sistema de Información de especies)	<a href="http://www.iucnredlist.org/">www.iucnredlist.org/</a>
	UICN: características relacionadas a la sensibilidad y la capacidad de adaptación al cambio climático de todas las aves, anfibios y corales	Consulte la información complementaria de <a href="http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0065427">www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0065427</a> . Datos básicos disponibles a solicitud a través de <a href="mailto:redlist@iucn.org">redlist@iucn.org</a>
	Utheria: rasgos de los mamíferos	<a href="http://www.utheria.org/">http://www.utheria.org/</a>
	TRY: rasgos de las plantas	<a href="http://www.try-db.org/">http://www.try-db.org/</a>
	Traitnet: rasgos de las plantas	<a href="http://traitnet.ecoinformatics.org/">http://traitnet.ecoinformatics.org/</a>
	BirdLife Data Zone	<a href="http://datazone.birdlife.org/home">http://datazone.birdlife.org/home</a>
	Amphibiaweb	<a href="http://amphibiaweb.org/">http://amphibiaweb.org/</a>
	Biotraits: respuestas térmicas de los rasgos fisiológicos y ecológicos, especialmente las interacciones consumidor-recurso (1508 spp)	<a href="http://biotraits.ucla.edu/">http://biotraits.ucla.edu/</a>
	Mamíferos, reptiles, peces de agua dulce y algunas plantas del área africana de Albertine Rift	(Carr et al., 2013). Calificaciones disponibles en los apéndices de: <a href="http://www.traffic.org/non-traffic/SSC-OP-048.pdf">http://www.traffic.org/non-traffic/SSC-OP-048.pdf</a> . Datos básicos disponibles a solicitud a través de <a href="mailto:redlist@iucn.org">redlist@iucn.org</a>
Datos moleculares	Genbank: colección comentada de todas las secuencias de ADN disponibles públicamente	<a href="http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/">http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/</a>
<b>Datos climáticos</b>		
Proyecciones de pasado distante o paleoclimáticas	NOAA	<a href="http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data">http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data</a>
	Unidad de Investigación Climática (Universidad de East Anglia)	<a href="http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/paleo/">http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/paleo/</a>
Proyecciones climáticas de pasado reciente o referencia	Various datasets based on meteorological and satellite data.	See <b>Table 8</b> for details.
Proyecciones futuras	Centro de Distribución de Datos del IPCC	<a href="http://ipcc-data.org/">http://ipcc-data.org/</a>
	WORLDCLIM	<a href="http://www.worldclim.org/">http://www.worldclim.org/</a>
	AFRICLIM para el clima africano	<a href="https://www.york.ac.uk/environment/research/kite/resources/">https://www.york.ac.uk/environment/research/kite/resources/</a>

**Tabla 6. Ejemplos de recursos de datos disponibles para la realización de EVCC** (adaptado de Pearson, 2010). Los ejemplos enumerados tienden a centrarse en escalas globales y continentales pero también existen disponibles muchos recursos a escalas regionales y nacionales.

**Ejemplos de recursos de datos públicos para la realización de EVCC**

Datos ecológicos		
Cobertura de la tierra y procesos ecológicos	Global Landcover Facility: cobertura de la tierra y otros productos, inundaciones	<a href="http://glcf.umd.edu/data/">http://glcf.umd.edu/data/</a>
	NASA (MODIS): cobertura de la tierra, nubosidad, frecuencia de incendios	<a href="https://modis.gsfc.nasa.gov/data/">https://modis.gsfc.nasa.gov/data/</a>
	USGS: Elevación y variables relacionadas para los Estados Unidos	<a href="https://www.usgs.gov/faqs/where-can-i-get-elevation-data">https://www.usgs.gov/faqs/where-can-i-get-elevation-data</a>
	SRTM: Modelo de elevación digital (90 m <sup>2</sup> )	<a href="http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1">http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1</a>
	Tipo de suelo: UNEP	<a href="http://www.grid.unep.ch/data/data.php?%20category=lithosphere">http://www.grid.unep.ch/data/data.php?%20category=lithosphere</a>
	Cuencas (o hidrocuencas): <i>Lehner y Grill (2013)</i>	<a href="http://hydrosheds.org/">http://hydrosheds.org/</a>
	NOAA: Varios productos oceanográficos	<a href="http://www.nodc.noaa.gov/access/">http://www.nodc.noaa.gov/access/</a>
Respuestas humanas al cambio climático	Vulnerabilidad al cambio climático de los surafricanos para el año 2050 ( <i>Human vulnerability to climate change in Southern Africa by 2050</i> ) (Midgley et al., 2011)	<a href="https://www.researchgate.net/publication/236142891_Climate_risk_and_vulnerability_mapping_in_Southern_Africa_status_Quo_2008_and_Future_2050">https://www.researchgate.net/publication/236142891_Climate_risk_and_vulnerability_mapping_in_Southern_Africa_status_Quo_2008_and_Future_2050</a>
Recursos técnicos		
Análisis geoespaciales	Quantum GIS	<a href="http://www.qgis.org/en/site/">http://www.qgis.org/en/site/</a>
	GRASS GIS	<a href="http://grass.osgeo.org/download/">http://grass.osgeo.org/download/</a>
	WorldMap	<a href="http://worldmap.harvard.edu/">http://worldmap.harvard.edu/</a>
	R	<a href="https://www.r-project.org/">https://www.r-project.org/</a>
	Python	<a href="https://www.python.org/">https://www.python.org/</a>
	Software para la elaboración de modelos climáticos de hábitat asistido (SAHM, por sus siglas en inglés)	<a href="https://www.fort.usgs.gov/products/sb/5090">https://www.fort.usgs.gov/products/sb/5090</a>
Software para la elaboración de modelos climáticos correlativos	Maxent	<a href="http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/">http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/</a>
	openModeller	<a href="http://openmodeller.sourceforge.net/">http://openmodeller.sourceforge.net/</a>

## Información molecular

Los datos moleculares que se incluyen en los marcadores genéticos neutros pueden ayudar a determinar los procesos demográficos como la dispersión y las variaciones en el tamaño de la población. Los recientes avances de la tecnología de secuenciación ahora permiten seguir con precisión estos procesos a través de miles de marcadores genéticos, un aumento de tres órdenes de magnitud en los años recientes. Además, se pueden relacionar los marcadores con los genes seleccionados en el proceso de adaptación. Esto se puede utilizar para investigar la adaptación previa a diferentes ambientes (utilizando el enfoque correlativo) y la posible adaptación futura (utilizando modelos mecanicistas y análisis de viabilidad).

También se pueden utilizar los datos moleculares para calcular el potencial de adaptación de la especie pero no indican fácilmente la extensión en la que los cambios afectarán los rasgos que influyen la distribución y abundancia de las especies. Esto requiere una evaluación genética cuantitativa de variación dentro y entre las poblaciones, lo que puede ser más difícil de realizar que estudios moleculares, especialmente para especies con tiempos generacionales largos. Sin embargo, existe la posibilidad de

combinar los datos genómicos con los estudios fenotípicos para evaluar cuánto cambiarán los rasgos como resultado de evolución rápida. Generalmente, se encuentran disponibles los datos genéticos de pocas especies (p.ej., **Tabla 6**).

Generalmente, al aplicar los modelos correlativos se asume que las poblaciones de las especies responden al cambio climático de la misma manera en su área de distribución. Sin embargo, la adaptación local puede mejorar la adecuación de la población a su entorno inmediato a través de la reducción del alcance de su nicho en comparación con la especie como un todo (Shaw & Etterson, 2012). Cuando esto ocurre, aplicar un modelo correlativo a una especie como un todo puede sobreestimar la capacidad de la especie de soportar el cambio climático anticipado (O'Neill et al., 2008; Pearman et al., 2010; Valladares et al., 2014; Hällfors et al., 2016). Se pueden utilizar los datos moleculares en este contexto como representación de la escala espacial de adaptación local en una especie, por ejemplo, dividiendo la especie en subgrupos incompatibles (linajes) y estimar la vulnerabilidad de cada grupo por separado (por ejemplo, Pearman et al., 2010; Hällfors et al., 2016).

## Datos climáticos

En este apartado discutimos brevemente las tres categorías de datos climáticos, pero proporcionamos explicaciones más detalladas, incluyendo sus usos, en la Sección 5.1.3 (Conjunto de datos climáticos). Las proyecciones climáticas del pasado remoto o paleoclimatológicas pueden extender los registros climáticos desde cientos a millones de años y resultan del uso de métodos proxy como la disolución de isótopos en sedimentos y hielo o la inferencia de la tasa de crecimiento de las plantas a través de los anillos fosilizados de los árboles (Folland et al., 2001). Pueden ser utilizados para formar y evaluar las distribuciones de las especies establecidas a través de modelos correlativos, desarrollando correlaciones climáticas basadas en escalas de períodos históricos más largos (Lawing & Polly, 2011). Para lograr esto, también se necesitan los datos de la distribución histórica de las especies, los cuales se infieren normalmente de evidencia fósil. Ambos tipos de datos están sujetos a imprecisiones relacionadas con la veracidad de las muestras originales y la interpolación de técnicas utilizadas, lo que debe considerarse al utilizarlas para hacer inferencias sobre las distribuciones actuales y futuras de las especies. Existen disponibles varios conjuntos de datos paleoclimatológicos (consulte la **Tabla 6**). Se pueden utilizar potencialmente en todos los enfoques de EVCC pero han sido más comúnmente asociados a los enfoques correlativos (p.ej., Huntley et al., 2006).

Los datos climáticos del **pasado reciente o referencia** intentan representar las condiciones de inicio de los impactos del cambio climático antropogénico (es decir, normalmente desde medio siglo antes del año 2000). Una diferencia fundamental es que los datos climáticos de referencia resultan de observaciones reales de una estación meteorológica mientras las proyecciones climáticas futuras provienen de Modelos Globales de Circulación (GCM por su sigla en inglés). Los datos climáticos de referencia se utilizan para inferir las condiciones climáticas en las que se presume habrá equilibrio en las distribuciones de las especies, por lo que son importantes para identificar las variables que teóricamente limitan a cada especie. Es por esto que son utilizados para elaborar modelos correlativos como base para proyecciones futuras y son un punto de referencia fundamental para medir los cambios futuros proyectados. Todos los enfoques de EVCC requieren el uso de observaciones climáticas de referencia, con la excepción ocasional de algunos enfoques basados en rasgos en los que falten datos de área de distribución o donde solo se necesiten las evaluaciones de susceptibilidad biológica. Analizaremos con más detalles los conjuntos de datos climáticos de referencia en la Sección 5.1.3 (Conjunto de datos climáticos) y proporcionamos ejemplos de los conjuntos de datos disponibles en la **Tabla 8**.

Las proyecciones futuras del clima se obtienen a través de los GCM, modelos matemáticos de cálculos complejos que simulan los procesos atmosféricos y oceánicos, incluyendo los componentes del hielo marino y de la superficie terrestre, para realizar predicciones climáticas y proyectar el cambio climático. Muchos grupos y laboratorios en el mundo utilizan GCM para obtener las proyecciones de los climas futuros en base a varias corridas de cada modelo a fin de ajustar las imprecisiones de los componentes naturales como la reatalimentación (por ejemplo, la amplificación o moderación de los cambios físicos por nieve o ambientes helados)

(criosférica (nieve y hielo), así como las imprecisiones de las variables antropogénicas como las asociadas a las emisiones futuras de gases de efecto invernadero. La modelación de la imprecisión de los diferentes escenarios de emisiones se realizan de acuerdo a diferentes escenarios posibles de concentraciones esperadas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Los escenarios más recientes son los definidos por las Trayectorias de Concentración Representativa (RCP) asociadas con el Quinto (el más reciente) informe del IPCC (Moss et al., 2010; IPCC, 2013b).

A pesar de que todos los diferentes modelos y sus corridas producen proyecciones, ninguno reproduce perfectamente los sistemas climáticos a estudiar y aún tienen numerosas imprecisiones. En consecuencia, se recomienda que se utilicen varios modelos y corridas. Es muy importante mantener y utilizar una medida sobre las discrepancias entre los modelos a fin de comprender las imprecisiones de las predicciones y ajustarlas e informarlas para sus usos subsiguientes (consulte la Sección 5.1.3 (Conjunto de datos climáticos) para obtener mayor información, incluyendo información sobre la selección del modelo, los escenarios de emisiones y las variables bioclimáticas).

El Centro de Distribución de Datos del IPCC (<http://ipcc-data.org/>) es un portal que contiene un amplio intervalo de conjuntos de datos climáticos futuros. Se recomienda ampliamente consultar la Sección “Guía para el uso de datos” (incluyendo las directrices técnicas, las fichas técnicas, los materiales de apoyo, los procesos de escenario, las definiciones, etc.). Al igual que los datos climáticos de referencia, las proyecciones climáticas futuras son necesarias en todos los enfoques de EVCC, excepto cuando se utilicen métodos basados en rasgos por la falta de datos de área de distribución o para realizar EVCC simples y preliminares. En el caso de los modelos correlativos y mecanicistas, se utilizan las proyecciones climáticas futuras para proyectar la adecuación climática futura de los entornos, y en el caso de los enfoques basados en rasgos, para proyectar la exposición al cambio climático de las áreas de distribución actuales de especies.

## Datos ecológicos

Se han utilizado conjuntos de datos espacialmente explícitos de **cobertura de la tierra**, (que representan los ecosistemas y/o hábitats), **elevación** y **tipo de suelo** de diferentes maneras en las EVCC y son importantes para los tres enfoques principales de EVCC. Anteriormente discutimos cómo el hábitat y las asociaciones de elevación pueden ser utilizadas para perfeccionar los mapas de área de distribución de las especies (es decir, al eliminar áreas de hábitat y elevación inapropiadas en las que no existiría la especie (Boitani et al., 2007; Beresford et al., 2011; Foden et al., 2013)). También se pueden utilizar junto a las proyecciones climáticas para obtener cálculos más precisos de la adecuación futura de cada componente/cuadrícula terrestre para las especies focales. También se pueden utilizar las proyecciones espaciales de procesos como los **incendios**, **la elevación del nivel del mar** y la **hidrología** para este propósito. Por ejemplo, Aiello-Lammens et al. (2011) utilizó información sobre la geomorfología terrestre, la elevación y el aumento proyectado del nivel del mar y otra información específica del lugar como la tasa de erosión, la frecuencia de las tormentas y las tendencias de la marea para predecir los impactos del elevación



del nivel del mar sobre los chorlos nevados en Florida. Estos datos físicos y ecológicos tanto terrestre como marinos se han utilizado en los enfoques correlativos, mecanicistas, a base de rasgos y combinados. Se debe considerar cuidadosamente las imprecisiones de los datos. Hablaremos con más detalle sobre este tema en la Sección 5.1.6 (Considerando la disponibilidad de hábitat).

### Impactos indirectos del cambio climático

Hasta la fecha las EVCC no han reflejado lo suficiente las amenazas a la biodiversidad causadas por los impactos indirectos del cambio climático, a pesar de su potencial para reflejar los impactos directos que tiene sobre las especies (Turner et al., 2010; Maxwell et al., 2015). Consideramos entre los impactos indirectos aquellos causados por las respuestas humanas al cambio climático (p.ej., expansión de las plantaciones de biocombustibles, la construcción de diques y rompeolas, la expansión hacia zonas aptas nuevas para la agricultura y la pesca) y de los sistemas naturales que habitan las especies focales (p.ej., aumento de la exposición y la susceptibilidad a patógenos y especies invasivas; disminución de la disponibilidad de recursos). Estos impactos pueden interactuar con amenazas no climáticas, potencialmente aumentando en gran medida sus impactos. Normalmente, los enfoques mecanicistas y basados en rasgos consideran los cambios de las interacciones entre las especies y todos los enfoques incorporan implícitamente los aspectos de cambio de la adecuación del hábitat. Sin embargo, pocos consideran las respuestas humanas al cambio climático o los efectos del cambio climático sobre amenazas no climáticas. Discutimos más detalladamente este aspecto importante, aún ignorado, de las EVCC en la Sección 5.2.1 (Los impactos directos versus los indirectos del cambio climático).

### Experiencia

Asumimos que los profesionales tienen la experiencia para utilizar softwares de computación convencionales (p.ej., Microsoft Excel) y en este documento distinguimos dos tipos adicionales principales de experiencia: la técnica y la biológica. Consideramos que las EVCC son realizadas con frecuencia por equipos, lo que facilita obtener combinaciones adecuadas de experiencias.

Normalmente, se requiere relativamente poca **experiencia técnica** para aplicar los enfoques basados en rasgos que involucran la recolección de información, por ejemplo, en una hoja de cálculo y utilizando cálculos simples para combinarlos en clasificaciones o puntajes generales. El nivel de experiencia necesario para evaluar la exposición de las especies al cambio climático varía de muy poco por ejemplo, en las evaluaciones en las que se usan superposiciones simples de superficies climáticas preprocesadas (a saber, [www.climatewizard.org](http://www.climatewizard.org) en EE. UU.); hasta muy complejo, con el requisito de tener experiencia en el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para otras. El Índice de Vulnerabilidad al Cambio Climático de NatureServe (CCVI, Young et al., 2011) es una herramienta bien documentada y de fácil uso que proporciona una opción de EVCC que requiere poca experiencia técnica.

No se puede generalizar los niveles de experiencia técnica que requieren los enfoques correlativos y mecánicos de EVCC ya que existen muchos métodos disponibles para ponerlos en práctica. Algunos enfoques estadísticamente complejos proporcionan interfaces de fácil uso (p.ej., MaxEnt; BIOMOD) por lo que

necesitan poca experiencia técnica para su ejecución, mientras que otros requieren el conocimiento de lenguaje de programación como R y/o amplias competencias en los SIG. Instamos firmemente a los usuarios a familiarizarse con los aspectos técnicos asociados a los métodos a usar, incluso de los métodos de fácil uso, ya que es necesario para parametrizar correctamente, evaluar la sensibilidad e interpretar responsablemente los resultados de sus configuraciones. También es recomendable que los evaluadores comprendan los métodos utilizados para preparar los datos de proyección climática a utilizar, ya que sus supuestos, imprecisiones y aproximaciones usadas para reducir la escala son importantes parámetros de las EVCC. Obtendrá más información sobre este tema en la Sección 5.1.3 (Selección y uso de conjuntos de datos climáticos).

La **experticia biológica** es altamente deseable y en muchos casos esencial para las EVCC. En su forma más simple, los enfoques correlativos pueden basarse solo en los datos de distribución, pero sin la experiencia biológica, no se pueden identificar los errores y se pueden fácilmente malinterpretar los resultados. Aspectos importantes para interpretar los resultados de los modelos correlativos en las evaluaciones de vulnerabilidad es tener una comprensión completa de los mecanismos de dispersión de las especies, el potencial de dispersión y colonización y sus requisitos biológicos. Por definición, las evaluaciones basadas en rasgos necesitan conocimientos sobre la biología y ecología de las especies y los enfoques mecanicistas (incluyendo los combinados correlativos-mecanicistas) generalmente son los que más requieren experiencia biológica, ya que los usuarios deben seleccionar no solo las variables a incluir sino cómo serán parametrizadas y cómo interactúan entre ellas. La experiencia biológica es también particularmente importante para evaluar dónde y cómo se pueden llenar los vacíos de información utilizando, por ejemplo, características inferidas o proxy.

### Requisitos técnicos

Las evaluaciones simples pueden solo requerir una aplicación de hoja de cálculo (p.ej., basadas en rasgos; el CCVI de NatureServe (Young et al., 2012)), pero cuando los conjuntos de datos son más grandes (p.ej., >100.000 registros) la capacidad de almacenamiento y la funcionalidad del software puede ser limitante. Las bases de datos como Microsoft Access y Microsoft SQL Server son más estables, mucho más rápidas, permiten el procesamiento en masa de grandes cálculos repetidos y tienen funciones fácilmente personalizables. Por supuesto, se debe compensar los beneficios de los softwares más sofisticados con los costos de compra y el tiempo y esfuerzo necesarios para aprender a utilizarlos. Está aumentando la popularidad y uso del lenguaje estadístico y el entorno de programación R (también denominado GNU S (N. del T.: aunque no son sinónimos directos)) dado que es un paquete software de fuente abierta que permite el almacenamiento y análisis de grandes conjuntos de datos.

También, se encuentran disponibles diferentes paquetes de software diseñados específicamente para el análisis y la predicción de las distribuciones de las especies (a saber, enfoques correlativos), incluyendo, entre otros, MaxEnt, ModEco y muchos paquetes en R. Cada uno de estos paquetes requiere algo de capacitación para poder utilizarlos responsablemente y para interpretar sus resultados; así como cada uno tiene diferentes ventajas y

desventajas con respecto a los otros. En el **Apéndice Tablas A-D** encontrará ejemplos sobre los diferentes métodos y modelos.

Finalmente, a pesar que muchos paquetes de software incluyen un componente espacial, muchas veces será útil para los evaluadores trabajar con un paquete de software de SIG independiente, especialmente al construir mapas para mostrar los resultados de la evaluación. El paquete software de SIG más comúnmente utilizado es ArcGIS, pero los paquetes de SIG de acceso abierto como QGIS, DIVA-GIS (diseñado pensando en los procesos asociados a la elaboración de modelos de distribución de especies), PostgreSQL y PostGIS, entre otros, con frecuencia serán más que suficiente. También están disponibles diferentes paquetes de software adicionales diseñados para conectarse a softwares SIG y realizar análisis específicos de EVCC. Uno de ellos es RAMAS GIS, un programa diseñado para combinar datos geográficos y demográficos de las especies a fin de realizar análisis de viabilidad poblacional espacialmente explícitos. Reiteramos que los paquetes de software enumerados en este documento son solo ejemplos del amplio intervalo disponible y alentamos a los lectores a explorar otras opciones disponibles que se puedan adaptar mejor a sus necesidades.

Generalmente, las especificaciones del hardware de computación requerido están determinadas por el tamaño total de los datos a procesar y la complejidad de las operaciones a realizar. A su vez, el tamaño de los datos a procesar es determinado por diferentes factores, incluyendo, entre otros, la resolución espacial de las coberturas geoespaciales (p.ej., datos climáticos, cobertura del suelo), el alcance geográfico de la evaluación y el número de especies a evaluar. En general, será mejor mientras mayor sea la capacidad de almacenamiento disponible y mientras más rápido sea el poder de procesamiento de la computadora; y en algunos casos, puede ser necesario utilizar dispositivos de almacenamiento externo de datos y hardware avanzado de 'supercomputadora'. En el peor de los casos, al realizar las evaluaciones con capacidad insuficiente de almacenamiento o procesamiento de datos fallarán las operaciones a ejecutar, aunque con frecuencia, simplemente tomará más tiempo realizar los procesos. Los evaluadores con capacidad limitada de hardware deberán transigir entre el tiempo de computo y el alcance o complejidad de su evaluación.

## Paso 4. ¿Los pasos 2 y 3 identifican algún enfoque en común?

El objetivo de este paso es identificar si hay uno o más enfoques de EVCC que cumplan los objetivos o para los que haya suficientes recursos disponibles. En circunstancias ideales, los usuarios pueden encontrar que **varios enfoques se superponen** y en circunstancias menos ideales, que **solo un enfoque se superpone** entre los enfoques seleccionados por los objetivos y los seleccionados por los recursos. Sin embargo, ambas circunstancias permiten que los profesionales avancen a los siguientes pasos.

En circunstancias no adecuadas, los usuarios pueden encontrar que ninguno de los enfoques se superpone. Esto se puede deber, primero, a que se establecieron objetivos muy ambiciosos con respecto a los recursos disponibles. Por ejemplo, un profesional puede desear evaluar la vulnerabilidad al cambio climático de

cada población individual de una especie particular en un lugar, utilizando un enfoque mecanicista, sin tener los datos demográficos o de distribución a pequeña escala o sin la experiencia en SIG necesaria para implementarlos. La mejor estrategia en este caso es revisar los objetivos y hacerlos más amplios y alcanzables utilizando enfoques que demanden menos recursos.

Un segundo escenario posible de no encontrar coincidencias entre los enfoques seleccionados para los objetivos y los seleccionados para los recursos, se asocia a la insuficiente disponibilidad de datos para cualquier enfoque de EVCC. En estos casos de pocos recursos de datos se deben evaluar las opciones de recolección de los datos necesarios, mejorar los recursos técnicos (es decir, comprar hardware y software de computación) y aumentar la capacidad y experiencia para implementar los enfoques de EVCC.

## Paso 5. Seleccionar su(s) enfoque(s) y los métodos para aplicarlo(s)

Dadas las fortalezas y debilidades relativas de cada enfoque de EVCC y la falta actual de estudios que validen la precisión de cada uno en contextos diferentes, una manera sabia de proceder de los usuarios es el aplicar más de un enfoque y utilizar la amplitud de los resultados de EVCC para comprender la imprecisión resultante. Sin embargo, en la práctica los diferentes enfoques superpuestos que resultan del Paso 4, y el tiempo y los recursos disponibles para las EVCC, informarán a los usuarios si se debe seleccionar uno o más enfoques.

### Opción 1: Utilizar un solo enfoque de EVCC

Dado que es imposible comparar los resultados de otros enfoques, es particularmente importante que los usuarios entiendan las fortalezas, las limitaciones y los márgenes de error del enfoque seleccionado e interpretar los resultados en el contexto de la biología y ecología de la especie focal. Se recomienda utilizar diferentes métodos para aplicar el enfoque ya que, cuando sea posible, suministrarán la cantidad de resultados necesaria para explorar la imprecisión de la evaluación causada por el(los) método(s) seleccionado(s). El **Cuadro 4** proporciona una guía para seleccionar los métodos apropiados. La Opción 2a describe maneras en las que se pueden utilizar los resultados de múltiples métodos en las EVCC.

### Opción 2: Uso de diferentes enfoques de EVCC

En las circunstancias ideales en las que se puede utilizar más de un enfoque para cumplir los objetivos de EVCC y con los recursos disponibles para su aplicación, los usuarios tienen dos opciones para proceder, de las cuales pueden aplicar una o ambas (consultar Cruz et al., 2015).

#### 2a. Realice las evaluaciones de manera separada utilizando varios enfoques y/o métodos

Esto se realiza mejor al entender las ventajas y limitaciones claves de cada método y en el contexto de la biología y ecología de la especie focal. Sugerimos cuatro maneras, utilizando el sentido común, para combinar los resultados de enfoques y métodos múltiples.

**Cuadro 4.** Seleccionar el(los) método(s) para aplicar los enfoques de EVCC

Proporcionamos clasificaciones y ejemplos de algunos de los métodos principales disponibles para los enfoques correlativos, basados en rasgos, mecánicos y combinados en el **Apéndice Tablas A, B, C y D** respectivamente. Incluyen explicaciones sobre cómo funciona cada tipo de método, sus requisitos particulares de recursos, ejemplos de sus usos y si existen herramientas disponibles de fácil uso para su aplicación. Sin embargo, consideramos que con el rápido desarrollo de este campo, probablemente estas tablas se desactualicen rápidamente, probablemente mucho antes de que se publique la próxima versión de estas directrices.

**Alentamos a los usuarios a realizar dos tareas importantes al seleccionar su(s) método(s):**

1. Realizar una revisión completa de la literatura para conocer los últimos métodos disponibles para su(s) enfoque(s) de EVCC. Los aspectos claves a considerar incluyen la prevalencia de su uso, los requisitos de recursos y sus ventajas y límites claves.
  2. Leer las Secciones 5 y 6 de estas directrices, que hablan acerca de algunas de las opciones y desafíos de la aplicación de los métodos y las imprecisiones que posiblemente surjan de ellos, incluyendo las causadas por el método elegido.
- i) En el nivel más amplio se puede aplicar un enfoque de consenso. Se pueden utilizar los resultados, por ejemplo, para distribuir los taxones focales en categorías de interés de acuerdo a una combinación del grado de vulnerabilidad esperado y la proporción de los modelos (y por ende, certeza) de predicciones (consulte la **Figura 9**).
- ii) Se puede utilizar un **enfoque de conjunto** en las EVCC que producen resultados cuantitativamente similares (p.ej., una serie de proyecciones de área de distribución de diferentes métodos correlativos). Estos producen tanto medidas de la tendencia central (p.ej., promedio, media) como de dispersión (p.ej., variación, coeficiente de variación) de los resultados de la EVCC. Notamos que los resultados de los métodos del mismo enfoque pueden ser correlacionados y que las comparaciones entre enfoques introducen una mayor cantidad de resultados,

por lo que puede ser apropiado ponderar los resultados de maneras diferentes.

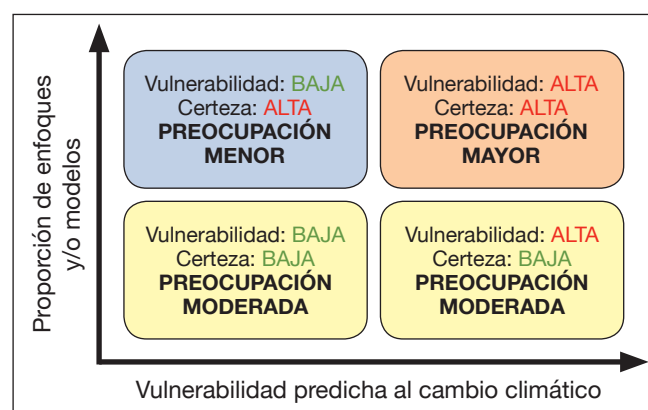
- iii) Puede ser útil utilizar los límites o extremos de proyección superior e inferior para proponer los **escenarios de mejor y peor caso** (con un intervalo factible de posibilidades entre ellos) cuando los resultados de la EVCC son cualitativamente diferentes y se puede aplicar junto a un enfoque de consenso (sugerencia i)).
- iv) En los casos en los que los resultados de la EVCC difieren notablemente y donde se carece de evidencias que los respalden, los usuarios pueden elegir utilizar el **principio de precaución** y utilizar la evaluación de vulnerabilidad más alta como base para determinar el nivel de riesgo del taxón focal.

Sin importar cuál de los enfoques anteriores es el seleccionado, es importante investigar las razones de la inevitable variabilidad en los resultados. Esto puede exponer cualquier error que haya en la evaluación y aumentar considerablemente la solidez de las conclusiones extraídas de los resultados.

**2b. Enfoques combinados**

Los enfoques híbridos de EVCC que combinan elementos de dos o más enfoques han comenzado a surgir y potencialmente se basan en las fortalezas de los métodos que los componen. Resumimos seis tipos que surgen de ellos, describiendo brevemente cómo funcionan, las herramientas disponibles, los recursos que requieren y ejemplos publicados (**Apéndice Tabla D**). Estos incluyen las combinaciones de los enfoques correlativos y basados en rasgos; correlativos y mecanicistas; y correlativos, mecanicistas y basados en rasgos. Willis et al. (2015) identifica las diferentes maneras en las que se pueden combinar los enfoques correlativos y basados en rasgos, incluyendo su uso en la planificación de la conservación espacial. Sugieren que los enfoques correlativos se pueden beneficiar de las medidas de sensibilidad de los enfoques basados en rasgos (p.ej., las tolerancias climáticas conocidas) y la capacidad de adaptación (incluyendo la capacidad de dispersión) (p.ej., Warren et al., 2013); mientras que los enfoques basados en rasgos se pueden fortalecer al utilizar las proyecciones de área de distribución derivadas de los enfoques correlativos para calcular las tolerancias climáticas y la exposición al cambio climático (p.ej., Thomas et al., 2011; Young et al., 2011a; Smith et al., 2016).

**Figura 9.** Marco para interpretar los resultados de los enfoques y métodos múltiples de EVCC de acuerdo a un enfoque de consenso.



Ha comenzado a recibir atención el uso de rasgos para informar las proyecciones de dispersión y capacidad de colonización de las especies. Estrada et al. (2016) describe el marco a utilizar resaltando cómo siete tipos de rasgos afectan cuatro procesos claves de cambio de área de distribución, a saber (con los rasgos entre paréntesis): (i) la emigración (fidelidad de sitio); (ii) movimiento (capacidad de movimiento); (iii) establecimiento (evasión de efectos de pequeñas poblaciones, persistencia en condiciones desfavorables) y (iv) proliferación (estrategia reproductiva; generalización ecológica y habilidad competitiva (estos tres rasgos aplican a los procesos (iii) y (iv))). García et al. (2014) utilizan los rasgos para identificar las regiones en las que las proyecciones de área de distribución correlativas pueden subestimar o sobreestimar las evaluaciones de la vulnerabilidad al cambio climático de las especies; mientras que Visconti et al. (2015) utilizan cálculos de distancias de dispersión y duración de las generaciones, específicas





El tucán pico iris (*Ramphastos sulfuratus*) en Costa Rica ha trasladado su hábitat desde llanuras y laderas hasta al menos 1540 m más arriba luego del aumento de los niveles base de las nubes por el cambio climático. © Andy Morffew

de las especies, para estimar la habilidad de las especies de seguir los cambios bioclimáticos proyectados en sus distribuciones. Discutimos algunos de los desafíos e imprecisiones del uso de tales datos de rasgos en la Sección 6.5 (Imprecisión en las características biológicas y los datos demográficos).

## 4.2 Enfoques para tres situaciones difíciles de EVCC: especies poco conocidas, de área de distribución pequeña y reducida

Una condición para los enfoques convencionales que hemos descrito hasta ahora en estas directrices es la disponibilidad de datos adecuados. Existen tres tipos de especies que presentan desafíos particulares para su aplicación: las especies poco conocidas, de área de distribución pequeña y de área de distribución reducida (consulte el **Cuadro 3**). Las “**especies poco conocidas**” son problemáticas cuando la escasez de datos sobre las incidencias, los rasgos o la fisiología, no permite la aplicación de los enfoques correlativos, basados en rasgos o mecanicistas respectivamente. También surgen desafíos cuando existen los datos de incidencia, pero las características de la especie focal hace que los datos sean inadecuados para la aplicación de los enfoques correlativos de EVCC. Este es el caso de las “**especies de área de distribución pequeña**” que tienen áreas de distribución pequeñas debido a, por ejemplo, alta especialización y para las “**especies área de distribución reducida**”, cuyas áreas de distribución han disminuido por amenazas antropogénicas (no climáticas).

Muchas especies poco conocidas carecen de datos biológicos para aplicarlos enfoques basados en rasgos y mecanicistas, particularmente las de pequeño tamaño corporal y con áreas de distribución más restringidas (González-Suárez et al., 2012). Muchas de las especies poco conocidas, así como las de área de distribución pequeña o reducida, también carecen de datos de incidencia suficientes para la aplicación del modelo correlativo. Dado que los enfoques

correlativos deben caracterizar estadísticamente las relaciones entre el área de distribución actual de las especies y las variables bioclimáticas que han ocurrido históricamente allí, estos requieren un número mínimo de registros de incidencia de las especies para poder extraer información a fin de producir resultados confiables. El Subcomité de Normas y Peticiones de UICN (UICN, 2014) recomienda, como regla general, tener al menos cinco registros de incidencia o cuadrículas de ‘presencia’ de la especie para cada variable bioclimática utilizada (consulte la Sección 5.1.4 (Selección y uso de los datos de distribución de las especies)). Otros autores sugieren un mínimo de 10, 50 o 100 registros en total, dependiendo del tipo y complejidad del modelo y de la especie que está siendo estudiada (Stockwell & Peterson, 2002; Wisz et al., 2008). De este modo, generalmente no se aplica ningún modelo a las especies con datos de incidencia que no cumplen estos requisitos.

Hasta la fecha, muchas evaluaciones a escala amplia se han basado en enfoques correlativos de múltiples especies (p.ej., Thomas et al., 2004; Araujo et al., 2006; Thuiller et al., 2011; Warren et al., 2013). A pesar de que en algunos casos la cobertura de las especies es excelente (p.ej., 90% de las aves de cría nativas de Europa; Huntley et al., 2008), es frecuente que se omita a una gran proporción de las especies, especialmente en las regiones con mayor biodiversidad, ya que no se tienen registros suficientes. Por ejemplo, en una evaluación de los vertebrados africanos (García et al., 2012), solo 33% de las especies registradas fueron incluidas en el modelo. Platts et al. (2014) encontraron que las especies omitidas en la EVCC correlativa realizada en África subsahariana representaban el 92% de los anfibios amenazados de la región y que los registros de estas especies comprendían diferentes condiciones climáticas y tasas de calentamiento climático comparados con los de las especies incluidas en el modelo. Estos ejemplos destacan que los métodos convencionales de EVCC están potencialmente limitados a una muestra sesgada de especies, produciendo conclusiones incompletas sobre los impactos del cambio climático en la biodiversidad (Schwartz et al., 2006; Platts et al., 2014).

Es muy importante la resolución espacial de los datos utilizados en los modelos correlativos, ya que los datos de distribución deberán ser utilizados dentro del modelo en la misma escala. En el caso de los datos climáticos con resolución de un grado, por ejemplo, una especie de área de distribución reducida puede observarse solo en algunas cuadrículas de ‘presencia’ (111 x 111 km en el ecuador), a pesar de que puedan existir cientos de registros locales en ellas. Se puede solventar este desafío para algunas especies aumentando la resolución espacial (y por lo tanto, reduciendo el tamaño de la cuadrícula) de los datos climáticos utilizando modelos basados en procesos, estadísticos o de reducción de escala empíricos. Sin embargo, en el caso de especies con muy pocos registros locales o áreas de distribución particularmente pequeñas, y para las que se necesitan resoluciones espaciales más bajas (p.ej., falta de disponibilidad de datos de incidencia a pequeña escala o capacidad limitada de procesamiento de datos), este desafío permanece.

A continuación resumimos cinco enfoques amplios para abordar los desafíos de realizar EVCC sobre especies poco conocidas, de área de distribución pequeña o reducida. El primero **(i)** es **recolectar datos** para poder utilizar los enfoques convencionales.

El segundo (ii) considera una situación en la que están disponibles **series cronológicas de datos poblacionales y climáticos**. Los otros tres describen enfoques alternativos de EVCC que permiten realizar las evaluaciones a pesar de la deficiencia de información. Estos incluyen (iii) **modificaciones de técnicas correlativas familiares**, (iv) la selección de **puntos focales taxonómicos alternativos** para los modelos y (v) la implementación de evaluaciones que consideren la **exposición de áreas geográficas** en vez de distribuciones particulares de las especies. Los cinco enfoques alternativos se resumen en la **Tabla 7**.

## i) Llenar la falta de datos

### Especies poco conocidas

La primera opción es recolectar los datos que faltan y son necesarios para aplicar los modelos convencionales correlativos, basados en rasgos o mecanicistas. Con frecuencia, para los datos de rasgos faltantes, los expertos pueden hacer inferencias de las especies relacionadas, por ejemplo, de especies de nivel taxonómico más alto (Foden et al., 2013). La falta de datos puede completarse a través de la opinión de expertos (Murray et al., 2009a; Flockhart et al., 2015) o utilizando técnicas de imputación de datos que se aplican a los conjuntos de datos de las especies relacionadas (Buckley & Kingsolver, 2012; Swenson, 2014; Taugourdeau et al., 2014; Schrodt et al., 2015). Al buscar llenar la falta de datos se recomienda evaluar la sensibilidad de los resultados con respecto a diferentes opiniones/técnicas comparando la inferencia resultante de las hipótesis “optimistas” con la de las “pesimistas”. Por ejemplo, se puede clasificar un rasgo desconocido como perjudicial o beneficioso para la posibilidad de supervivencia de una especie ante el cambio climático; la extensión en la que estás hipótesis opuestas afecta el resultado general de la EVCC proporciona una medida de imprecisión relacionada con la resolución de la falta de datos (Martin et al., 2012; Penone et al., 2014; Meng et al., 2016).

En los casos en los que, de acuerdo a la opinión de expertos o los informes publicados, se sospecha que los registros de distribución disponibles para la EVCC subestiman el área de distribución real de una especie, se puede mejorar sistemáticamente el cálculo de área de distribución a través de la aplicación iterativa de técnicas correlativas modificadas (consultar c) o a través de referencias a la literatura científica junto con el trabajo de campo específico (Williams et al., 2009; Platts et al., 2010).

### Especies de área de distribución reducida

En los casos en los que se conozca que amenazas no relacionadas al cambio climático han reducido considerablemente el área de distribución de la especie, incluir el área de distribución histórica puede posibilitar la aplicación de modelos convencionales y permitir la inclusión de un área de distribución más amplia de condiciones ambientales adecuadas en el modelo. Sin embargo, es importante controlar las posibles razones de la reducción de área de distribución en el modelo en su análisis posterior.

## ii) Análisis temporal de variabilidad poblacional

### Especies de área de distribución pequeña y reducida

Para las especies de las que no se tienen suficientes registros de incidencia para la aplicación de modelos correlativos o para las que la distribución espacial registrada o modelada no suministra una buena representación del nicho climático (p.ej., especialistas edáficos), el análisis temporal de la variabilidad poblacional podría proporcionar información útil sobre la vulnerabilidad de las poblaciones y de las especies como un todo a los cambios climáticos proyectados (Damschen et al., 2010). Este enfoque requiere series cronológicas sólidas de la variabilidad poblacional interanual, tanto en la rigurosidad del muestreo como en la duración del registro, para de esta manera aplicarlo a subconjuntos relativamente pequeños de especies. Los evaluadores deben considerar que, especialmente para las especies que tienen una alta variabilidad poblacional interanual natural, series temporalmente cortas y/o pocos puntos temporales pueden resultar en la falsa detección de efectos al cambio climático (McCain et al., 2016).

Un enfoque típico, cuando se tienen datos suficientes, es realizar una regresión lineal en la que la variable dependiente sea el cambio del tamaño de la población en el año anterior (usando frecuentemente registros transformados) y que las variables independientes sean las medidas climáticas experimentadas por la población durante el(los) año(s) anterior(es). Existen disponibles los datos climáticos para la mayoría de las regiones del mundo, en algunos casos desde los inicios del siglo XX (p.ej., la Unidad de Investigación Climática (CRU, por sus siglas en inglés) existe desde 1901; los productos satelitales desde la década de los 80 (CHIRPS, TAMSAT) o principio de los 2000 (MODIS); consulte la **Tabla 8** y Sección 5.1.3.3 (Conjuntos de datos históricos (referencia))). Algunas veces se incluye el tamaño de la población en el año anterior como covariable en el modelo a fin de controlar las respuestas de densidad. Si existen disponibles datos de más de un lugar dentro del área de distribución de la especie, estos se pueden incluir en el mismo modelo controlando las diferencias entre los lugares incluyendo el sitio como un factor aleatorio (modelo mixto; p.ej., Bennie et al., 2013).

Se ha utilizado el análisis temporal de la variabilidad poblacional para evaluar los impactos al cambio climático en las comunidades de aves (Pearce-Higgins et al., 2015) y lepidópteros en el Reino Unido (Bennie et al., 2013; Martay et al., 2016). La mayoría de los ejemplos hasta la fecha no se han orientado específicamente a las especies de área de distribución pequeña o reducida, pero se puede aplicar el enfoque sin importar el tamaño del área de distribución. Sin embargo, tener una muestra representativa del área de distribución conocida de la especie aumentará la fiabilidad en los motores de cambios climáticos identificados (Cayuela et al., 2016).

Si se detecta la señal de cambio climático de forma fiable a través de las series cronológicas históricas, se puede inferir la vulnerabilidad a los cambios climáticos futuros proyectados a través de las tendencias a largo plazo de los aspectos climáticos identificados como potencialmente importantes en el cambio poblacional (p.ej., estacionalidad o variabilidad interanual de la aumentada pluviosidad o del calentamiento promedio anual).

Tabla 7. Enfoques para tres situaciones difíciles de EVCC

	Especies poco conocidas	Especies de área de distribución pequeña	Especies de área de distribución reducida (no relacionado con el clima)
<b>Enfoques convencionales</b>			
<b>Modelos correlativos</b>	Estadísticamente problemático donde no existen suficientes registros de incidencia	Estadísticamente problemático por la falta de registros de incidencia	Problemático ya que no se puede utilizar la extensión del área de distribución para inferir el nicho ambiental
<b>Modelos mecánicos</b>	Problemático donde no existe suficiente información mecánica	Aplicable si existen datos mecánicos disponibles	Aplicable si existen datos mecánicos disponibles
<b>Modelos basados en rasgos</b>	Problemático donde no existe suficiente información sobre los rasgos	Aplicable si existen datos de rasgos disponibles	Aplicable si existen datos de rasgos disponibles
<b>Enfoques alternativos</b>			
<b>i) Llenar la falta de datos</b>	Alta prioridad; los datos adicionales o inferencias deben permitir la aplicación de todos los enfoques convencionales	Ventajoso para los enfoques correlativos si se conoce el área de distribución actual de los datos nuevos. Los datos nuevos de rasgos podrían permitir la aplicación de los enfoques convencionales basados en rasgos y mecanicistas	Se recomienda obtener datos adicionales sobre localidades o área de distribución donde la especie se extinguió a fin de complementar los registros de incidencia existentes del modelo correlativo (y así aumentar la cobertura del nicho ambiental). Los datos adicionales de rasgos deben permitir la aplicación de los enfoques convencionales basados en rasgos y mecanicistas
<b>ii) Análisis temporal de la variabilidad poblacional</b>	Problemático donde no existe suficiente información de serie cronológica	Potencialmente aplicable, si existen disponibles datos de serie cronológica sólidos de la variabilidad poblacional interanual. Se debe considerar cuidadosamente los procesos demográficos subyacentes	Potencialmente aplicable, si existen disponibles datos de serie cronológica sólidos de la variabilidad poblacional interanual. Se debe considerar cuidadosamente los procesos demográficos subyacentes
<b>iii) Técnicas correlativas modificadas</b>	Potencialmente aplicable; ventajosa cuando los resultados a nivel de especie son esenciales, aunque serán menos confiables	Potencialmente aplicable y ventajosa cuando son esenciales los resultados a nivel de especies	Potencialmente aplicable, pero es importante garantizar que se incluyan los indicadores asociados al declive en el modelo o los utilizados para filtrar las proyecciones del mismo
<b>iv) Enfoque taxonómico alternativo</b>	Se puede aplicar la evaluación de grupos de especies asociadas cuando no son esenciales los resultados a nivel de especies. Se pueden aplicar utilizando los enfoques convencionales correlativos y basados en rasgos	Aplicar modelos correlativos a las especies relacionadas, particularmente cuando están estrechamente relacionadas a la especie focal (p.ej., especies especialistas de recurso o competidores cercanos). Se puede realizar la evaluación de grupos de especies asociadas cuando no son esenciales los resultados a nivel de especies; se puede aplicar utilizando los enfoques convencionales correlativos o basados en rasgos	Igual que para las 'especies de área de distribución pequeña'. Evaluar conjuntos es particularmente importante donde presenten una razón común del decrecimiento en la distribución. Garantizar que se incluyan los indicadores asociados al decrecimiento en el modelo o los utilizados para filtrar las proyecciones del mismo
<b>v) Evaluación de exposición del área geográfica</b>	Potencialmente aplicable si se conoce la región de incidencia y cuando no son esenciales los resultados a nivel de especies	Aplicable cuando no son esenciales los resultados a nivel de especies; potencial de obtener resultados más específicos sobre las especies utilizando los rasgos para interpretar las amenazas posibles y las oportunidades que surgen por la exposición de la región a los cambios climáticos	Aplicable cuando no son esenciales los resultados a nivel de especies; potencial de obtener resultados más específicos sobre las especies utilizando los rasgos para interpretar las amenazas posibles y las oportunidades que surgen por la exposición de la región a los cambios climáticos, considerando los impactos de las causas del declive de las especies

### iii) Técnicas correlativas modificadas

#### Especies de área de distribución pequeña

Algunas veces se han elaborado modelos de las especies con pocos registros de incidencia utilizando la técnica más simple del “grupo” de técnicas correlativas (Busby, 1991a), definida por el intervalo de valores ocupado por una especie en un conjunto de indicadores relevantes. Un ejemplo es la aplicación de grupos de nichos multidimensionales en los anfibios africanos (Platts et al., 2014). A fin de incluir hasta los anfibios con un solo registro de incidencia en una cuadrícula y de baja resolución, se definieron los grupos a través del intervalo intercuartílico de condiciones climáticas de mejor resolución dentro de esas cuadrículas. Las desventajas de este enfoque muy simplificado incluyen que es difícil evaluar el desempeño del modelo (a saber, la habilidad del modelo de predecir con precisión en el espacio o tiempo), el que todos los indicadores tienen el mismo peso al limitar la distribución de las especies y que generalmente se consideran las condiciones ambientales que se encuentran más allá del nicho como totalmente inadecuadas, lo que es problemático si no se han tomado suficientes muestras de las especies. La mayoría de los otros métodos correlativos permiten pronósticos diferentes a cero más allá del nicho observado, pero aún se encuentran sujetos a la alta imprecisión del modelo, especialmente cuando se aplica sobre muestras pequeñas (Thuiller et al., 2004; Pearson et al., 2006).

En otra aplicación (Hof et al., 2011), también en anfibios pero a escala global, se pudo realizar la evaluación de todas las especies a través de modelos correlativos simples basados en la distancia (la distancia euclidiana y Mahalanobis que miden la similitud de las incidencias de las especies en el medio o centro del espacio climático disponible). También se pueden adaptar técnicas de modelos correlativos más complejas para abordar menos incidencias; como por ejemplo, ajustar el “multiplicador de regularización” en MaxEnt, que controla el grado de sobreajuste del modelo (Hof et al., 2011). Alternativamente se pueden restringir los modelos a números pequeños (p.ej., dos) de indicadores ambientales relevantes antes de combinar muchos de los modelos en un modelo de consenso para las especies (Lomba et al., 2010). Este enfoque supera las limitaciones de la falta de incidencias y del sobreajuste del modelo a causa de muchos indicadores, lo que extiende la aplicación de los modelos correlativos a las especies de área de distribución pequeña. Siguiendo este enfoque se han elaborado con éxito modelos de plantas raras en Suiza con tan solo 10 registros de incidencia (Breiner et al., 2015).

#### Especies de área de distribución pequeña y reducida

Al aplicar las técnicas correlativas modificadas en especies de área de distribución limitada por factores no climáticos específicos (p.ej., proximidad al agua, tipo de suelo raro, área de distribución reducida por pérdida de los bosques), se debe tomar en cuenta este detalle al calibrar el modelo. Por ejemplo, la falta de datos (datos de antecedentes) generada en las regiones de suelo o uso del terreno puede resultar en la subestimación del nicho climático de las especies. En algunas circunstancias se puede superar este problema al controlar los factores relevantes no climáticos del modelo o al restringir la falta de datos a los lugares en donde se pudo haber registrado la especie si hubiese las condiciones

climáticas apropiadas. Idealmente, se debe elegir la falta de datos para reflejar las inclinaciones espaciales, ambientales y taxonómicas de los datos de presencia (Huntley et al., 2008; Phillips et al., 2009; Platts et al., 2013a).

### iv) Enfoque taxonómico alternativo

#### Especies poco conocidas, de área de distribución pequeña y reducida

Otra forma de considerar las especies de área de distribución pequeña, reducida y poco conocidas en las EVCC es definir un enfoque taxonómico alternativo para los modelos. La primera posibilidad es enfocarse en los requisitos de recursos de la especie de interés. Por ejemplo, en Australia Sur la evaluación de vulnerabilidad de una lagartija en peligro de extinción se basó en el modelo de la distribución de dos especies nativas de plantas de pastizal de pradera que mantienen a las poblaciones de arañas de las que dependen (Delean et al., 2013).

La segunda posibilidad es elaborar un modelo de las comunidades bióticas o conjuntos de especies en vez de las especies individuales. Las evaluaciones a nivel de comunidades combinan los datos de múltiples especies para describir el patrón espacial de la distribución de las especies en conjunto (Ferrier & Guisan, 2006). En este enfoque, se pueden elaborar modelos de diferentes entidades como tipos de comunidades con composición similar de especies o grupos de especies con distribución similar. Las evaluaciones a nivel de bioma (Midgley et al., 2003; Midgley & Thuiller, 2007), por ejemplo, ayudan a identificar las regiones dentro de lo(s) bioma(s) de las especies que son más vulnerables al cambio climático. Las aplicaciones de este enfoque incluyen la elaboración de modelos de las áreas adecuadas que sufrirán cambio climático futuro en los bosques nublados en México (Ponce-Reyes et al., 2013) y en el bioma del Karoo suculento en Sudáfrica (Midgley & Thuiller, 2007). En el caso de las especies poco conocidas, los modelos a nivel de comunidades toman las fortalezas de los de especies múltiples para optimizar la parametrización (Ovaskainen & Soininen, 2011) y selección del modelo (Madon et al., 2013). En el último caso, el conjunto de variables que producen el desempeño promedio más alto de muchas especies en oposición a la selección individual de cada especie resulta en un mejor rendimiento para las especies de área de distribución pequeña (Madon et al., 2013).

También se pueden identificar los conjuntos de especies de acuerdo a los rasgos que tienen en común o los hábitats asociados, asumiendo que responderán de manera similar al cambio climático. Se puede aplicar las técnicas del modelo convencional correlativo si se agregan todos los registros de incidencias de las especies en el conjunto. Los ejemplos de conjuntos de los que se han elaborado modelos incluyen tres especies climáticamente asociadas en México (Golicher et al., 2008), especies con rasgos comunes (Vale & Brito, 2015) y especies del pez ciprínido de agua dulce en EE. UU. agrupados de acuerdo a su ubicación y abundancia (McKenna, 2003; McKenna et al., 2013) o sus condiciones abióticas asociadas (McKenna, 2001).



Los modelos a nivel de comunidad se pueden combinar con los de nivel de especies en enfoques jerárquicos o de niveles múltiples en los que la información de un tipo de modelo se combina con o informa al otro. Las tres aplicaciones se enfocan en la flora endémica de California (Loarie et al., 2008), las diatomeas en Finlandia (Ovaskainen & Soininen, 2011) y las especies del pez ciprínido de agua dulce en EE. UU. (McKenna et al., 2013).

## v) Evaluación de exposición de áreas geográficas

### Especies poco conocidas, de área de distribución pequeña y reducida

Una opción viable, cuando no se pueden aplicar enfoques conocidos o alternativos de EVCC o cuando el objetivo es obtener una primera aproximación de los impactos potenciales en las especies poco conocidas, de área de distribución pequeña y reducida, es realizar evaluaciones que solo se centren en la exposición de las áreas geográficas al cambio climático. Tales evaluaciones deben basarse en la asociación entre las dimensiones múltiples del cambio climático y las diferentes amenazas y oportunidades que representan tales cambios para las especies que existen en esa región (García et al., 2014b). Por ejemplo, la desaparición de condiciones climáticas específicas amenaza a las especies con la pérdida del hábitat adecuado, mientras que la rapidez del cambio climático (Loarie et al., 2009) puede requerir que las especies busquen climas adecuados rápidamente. La aplicación de evaluaciones de exposición detalladas permite la identificación de las áreas geográficas que están más expuestas a

cambios climáticos particulares (Ohlemüller et al., 2006; Williams et al., 2007; Beaumont et al., 2010; Watson et al., 2013) y una evaluación cualitativa de las amenazas y las oportunidades para la biodiversidad que se pueden asociar a tales cambios climáticos (García et al., 2014b).

Cuando se conoce la ubicación o extensión de incidencia de especies de área de distribución pequeña, la elaboración de modelos puede tener un enfoque geográfico más específico. Por ejemplo, se ha demostrado que áreas de rareza a nivel continental coinciden con las áreas en las que desaparecerán climas en el futuro (Ohlemüller et al., 2008). Contrariamente, en una aplicación más local de la evaluación de exposición, que también consideró los obstáculos de dispersión y las tasas de endemismo de plantas en el Arco Montañoso Oriental de Tanzania y Kenia, se encontró que son más altas en los lugares en los que se proyectó que los climas conocidos permanecerán accesibles ante el cambio climático (Platts et al., 2013a). Cuando existen datos de rasgos disponibles, estos se pueden utilizar para explorar cuáles especies serán más o menos sensibles o se adaptarán mejor a los cambios climáticos identificados (García et al., 2014b) (consulte la Sección 2b). Por ejemplo, la desaparición de climas representa una gran amenaza para las especies que son altamente especializadas para tales condiciones, mientras que la rapidez del cambio climático amenaza particularmente a las especies que se encuentran limitadas por el clima y que son dispersores deficientes.

La inusual rana apulmonada (*Barbourula kalimantanensis*) de Borneo absorbe el oxígeno completamente a través de la piel. Esta adaptación la hace particularmente sensible al aumento de las temperaturas y la disminución de los niveles de oxígeno en el agua. Los aumentos de la severidad y la frecuencia de las condiciones climáticas extremas causadas por el cambio climático, como las tormentas y las sequías, también pueden amenazar esta especie. © David Bickford



# 5. Usando las EVCC e interpretando sus resultados

Brian Huntley, Wendy B. Foden, Adam Smith, Philip Platts, James Watson, y Raquel A. Garcia

## 5.1 Seleccionando y usando los datos de entrada

La Sección 4.1 (Pasos 2-5) aborda la 'Realización de su propia EVCC', incluyendo la selección de escalas espaciales, taxonómicas y temporales apropiadas para cumplir los objetivos de su EVCC y las consideraciones de datos necesarias para cumplirlos. Esta sección cubre la extensión y resolución de datos necesarias para cumplir tales objetivos.

### 5.1.1 Extensión espacial y resolución

La extensión espacial es el área total a considerar en una EVCC. Si se especifica un área como un país, unidad subnacional o lugar específico como el objetivo de la EVCC, con frecuencia esa área conforma la extensión espacial del análisis. Es importante incluir áreas continuas o cercanas al área de distribución actual de la especie y aquellas que puedan ser adecuadas en el futuro, desde el punto de vista climático, a fin de no sobrevalorar la vulnerabilidad de la especie focal.

Sin embargo, al utilizar muchos enfoques de modelos correlativos la extensión espacial debe incluir al menos la distribución geográfica completa de la especie focal y por consiguiente, el área de distribución completo de condiciones climáticas en la que existe actualmente. Dependiendo del período, puede ser necesario incluir áreas distantes a la distribución actual a fin de identificar el hábitat futuro. Es importante incluir una gran extensión espacial, primero, porque si solo se consideran partes de la distribución de la especie focal, los cálculos de las características del nicho, como el alcance del mismo, pueden ser subestimados o tergiversados, lo que podría causar la sobrevaloración de la vulnerabilidad. Segundo, dado que no es uniforme la magnitud de los cambios climáticos proyectados, se espera que algunos lugares, países y regiones experimenten cambios relativamente limitados mientras que otros experimenten condiciones completamente diferentes a las que se encuentran actualmente en cualquier parte de esa área al final (y en muchos casos, a la mitad) del siglo XXI. Si se establece la extensión espacial en una parte limitada del área de distribución de la especie focal, las evaluaciones pueden sobrevalorar la vulnerabilidad de la misma. Si se espera que esa área solo contenga climas nuevos (a saber, combinaciones de variables que no existen hoy en día en el área) entonces aparecerá en el futuro como no apta para las especies que se encuentran actualmente en el área, a pesar de que la combinación de condiciones puede ocurrir fuera del área focal. Los resultados correlativos de la EVCC posiblemente representen una sobrevaloración de la vulnerabilidad de la especie y no podrán justificar la entrada de especies que no existen actualmente en el área focal. Sin embargo, si los cambios climáticos proyectados en

el área limitada considerada son más pequeños que los proyectados en el área de distribución de las especies como un todo, entonces la evaluación puede subestimar la vulnerabilidad.

El grano o la resolución espacial es relevante cuando se debe realizar una EVCC utilizando un enfoque por medio de un modelo que requiere datos de cuadrícula y se refiere al área o la(s) dimensión(es) lineal(es) de las cuadrículas utilizadas. Con frecuencia se determinará el tamaño apropiado del grano a través de la resolución de los datos disponibles de tal manera que el conjunto de datos esenciales junto con la resolución más gruesa generalmente determina el límite al que se puede reducir el tamaño del grano. Por ejemplo, mientras que un modelo de elevación digital puede estar disponible en una cuadrícula de 50 m (a saber, 50 x 50 m), si se registran datos de distribución de la especie para una cuadrícula de 1 km (a saber, 1 x 1 km) entonces, la última es el tamaño de grano práctico más pequeño para la mayoría de los análisis.

A pesar de que en principio se puede utilizar un grano muy pequeño (p.ej., 10 m), en la práctica, diferentes consideraciones serán las que determinarán la resolución apropiada. Los datos de distribución de la especie pudieron haber sido registrados como de presencia/ausencia en las cuadrículas de un tamaño particular de grano o haber derivado de registros de puntos con precisión espacial limitada. Entonces, la resolución de la cuadrícula o la precisión del punto determinan efectivamente el tamaño mínimo de grano en el que se puede utilizar el modelo. La escala de heterogeneidad espacial considerada en la región también influenciará el tamaño apropiado de grano. Un grano más grueso puede presentar problemas en áreas de relativamente baja heterogeneidad espacial (p.ej., propiedades de terreno plano o superficie terrestre uniforme), mientras que se necesitarán granos más pequeños en áreas de mayor heterogeneidad espacial (p.ej., zonas topográficamente complejas o en superficies terrestres muy variables).

En muchos casos, la extensión general del área de distribución de las especies impondrá un límite práctico en el tamaño del grano debido a las demandas computacionales de los granos más pequeños. Mover las cuadrículas de 0,5° a 30" aumenta el número de cuadrículas en que se debe almacenar o procesar los datos en un factor de 3600, por lo que aumenta tanto el tiempo de cómputo como los requisitos de memoria para aplicar el modelo en al menos este factor. Aun cuando se utilicen solo escalas lineales de computación, un modelo que tarde 1 segundo para ajustarse a 0,5° necesitará 1 hora para ajustarse a 30", mientras que si se procesan las escalas por el cuadrado del tamaño de los datos, como se hace con frecuencia, entonces un modelo de 30" tardará 150 días en ajustarse.

Se deben considerar problemas adicionales al adoptar granos más pequeños. Primero, mientras que la mayoría de los patrones espaciales de la distribución y abundancia de una especie en un grano mayor a ~20 km. se pueden explicar generalmente a través variables bioclimáticas solamente (Luoto et al., 2007), en granos más pequeños generalmente se necesitará incluir también variables no climáticas relacionadas con la disponibilidad de hábitat (p.ej., cobertura del suelo, geología, tipo de suelo, características hidrológicas). Sin embargo, en granos muy pequeños, el hábitat es menos importante y es el microclima, no el macroclima, el factor que determina los patrones de distribución y abundancia de las especies que experimentan el clima límite (Gillingham et al., 2012a, 2012b). Además, elaborar modelos de tales especies en granos más gruesos puede generar la sobrevaloración severa de su vulnerabilidad al cambio climático (Gillingham et al., 2012a).

Es importante notar en este contexto que la interpolación de las variables climáticas que producen los conjuntos de datos de granos más pequeños generalmente disponibles asume que las cuadrículas son planas y no son influenciadas por sus vecinos. Hasta en el conjunto de datos de grano de 30" de WorldClim es discutible que se deban considerar los factores topográficos como la inclinación y el aspecto. Ya en este grano (0,855 km<sup>2</sup> en el ecuador; 0,000126 km<sup>2</sup> en los polos) puede ser muy importante el efecto de incidencia solar sobre la temperatura que es determinado principalmente por la inclinación y el aspecto. Estas variables topográficas también influyen los patrones de drenaje y por consiguiente, la redistribución de la precipitación que fluye en vez de filtrarse en el suelo. En muchos terrenos de alto relieve el efecto de sombreado de las áreas circundantes de mayor elevación también afecta las temperaturas locales al igual que los fenómenos como el drenaje de aire frío y los efectos asociados a la presencia de lagos (consulte Bennie et al., 2008, 2010; Maclean et al., 2012; Hodgson et al., 2015).

En el caso de las especies que ocupan hábitats de baja vegetación o la parte superior de los doseles de bosques, se han desarrollado modelos para calcular las condiciones microclimáticas de acuerdo a los registros del macroclima considerando los factores topográficos como la inclinación, el aspecto y la sombra de áreas adyacentes de mayor elevación (Bennie et al., 2008, 2010). En principio, estos modelos se pueden extender para calcular las condiciones microclimáticas bajo los doseles de bosques en los que las temperaturas que experimentan las especies de sotobosque generalmente son más frías y la humedad mayor que en áreas abiertas (De Frenne et al., 2013; Hardwick et al., 2015). Como regla general, se deben aplicar estos enfoques para generar cálculos de las variables microclimáticas relevantes de cualquier EVCC u otro estudio que utilice granos de ~1 km o menos. Sin embargo, para poder hacerlo, se debe considerar que se necesitará un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) adecuado y de grano pequeño para que se pueda calcular las variables topográficas necesarias en el área de estudio. También es importante considerar que en escalas espaciales pequeñas, dada la mayor aleatoriedad de los datos el modelo no funcionará tan bien como en escalas espaciales más grandes.

## 5.1.2 Períodos

La *extensión temporal* se refiere al período a considerar (p.ej., cambios climáticos para el 2050 o 2100). Tal como se discutió en la Sección 3. (Estableciendo las metas y objetivos de la evaluación de vulnerabilidad al cambio climático), esto dependerá de las necesidades del evaluador, la biología (p.ej., duración de las generaciones) del taxón focal y la duración de la serie temporal de los datos climáticos proyectados disponibles (principalmente hasta el 2100 pero algunas simulaciones de IPPC AR5 se extienden hasta el 2300).

La resolución temporal se refiere a la unidad de tiempo muestreada en el período considerado (p.ej., diario, mensual, anual). Rara vez se necesitará una resolución temporal de menos de un año en una EVCC, ya que solo pocas especies a considerar tienen una duración generacional menor a un año. No se debe confundir la resolución temporal con el período que pueden representar las variables climáticas relevantes. La temperatura media del mes más caluroso del año, por ejemplo, puede ser una variable relevante para la que una serie anual puede permitir la realización de una EVCC con una resolución temporal anual.

## 5.1.3 Conjuntos de datos climáticos

Una de las decisiones más importantes a tomar al realizar una EVCC es cuál proyección de condiciones climáticas futuras utilizar (Snober et al., 2013). Cuatro preguntas claves influyen esta decisión: (i) ¿cuál(es) modelo(s) de sistema climático se debe utilizar? (ii) ¿cuál(es) escenario(s) de emisiones es(son) apropiado(s)? (iii) ¿cuál conjunto de datos climáticos históricos o de referencia es apropiado? y (iv) ¿cuáles variables bioclimáticas se deben utilizar?

### 5.1.3.1 Modelos de circulación general (GCM, por sus siglas en inglés)

La selección del modelo climático debe favorecer los utilizados y recomendados más recientemente por el IPCC (p.ej., en el último Informe de Evaluación del IPCC) y que se puedan combinar por completo con modelos de circulación general atmosféricos-oceánicos (AOGCM, por sus siglas en inglés; p.ej., HadCM3 (Gordon et al., 2000)) o preferiblemente modelos del sistema terrestre (ESM, p.ej., HadGEM1 (Pope et al., 2007)) que normalmente han mejorado las representaciones de las interacciones atmosféricas de tierra-superficie, así como con las simulaciones de cobertura terrestre vegetal. Cuando la extensión espacial de la EVCC es relativamente limitada y especialmente en las regiones de topografía compleja, un Modelo Climático Regional (RCM, por sus siglas en inglés (Morales et al., 2007), p.ej., PRECIS) probablemente proporcione proyecciones más precisas, siempre que las condiciones límite utilizadas provengan de una simulación apropiada de un AOGCM o ESM, ya que los RCM operan de forma mecánica en resoluciones horizontales de diez, y no cientos, de kilómetros. La isla de Madagascar, por ejemplo, abarca más de 300 celdas de RCM (longitud de lado de 55 km) pero solo aproximadamente una docena de las celdas se encuentran normalmente en resolución de GCM.

El Experimento Coordinado de Reducción de Escala del Clima Regional (CORDEX, por sus siglas en inglés) ha suministrado conjuntos de datos regionales que han resultado de simulaciones de RCM. Estos son de escala continental y tienen un grano de 0,44 DD (~55 km en el Ecuador). Sin embargo, hasta los modelos regionales son incapaces de resolver adecuadamente la variabilidad climática a pequeña escala en las regiones de alto relieve. Se debe entonces realizar un paso subsiguiente, no mecanicista, de elaboración de escenarios climáticos de escala reducida se recomienda para recuperar la variación espacial de pequeña escala, a escalas menores que el RCM y para eliminar el margen de error del modelo en comparación con los datos climáticos de referencia (consulte la Sección 5.1.3.5 (Comprendiendo y preparando escenarios climáticos futuros)). En la mayoría de los casos es preferible realizar una EVCC utilizando proyecciones equivalentes de cada uno de los diferentes modelos climáticos (por lo menos tres). Se deben seleccionar estos modelos de tal manera que abarquen el intervalo de imprecisión de los modelos; elegir diferentes modelos que proporcionen proyecciones cercanas al promedio del ensamble de todos los modelos incluidos por el IPCC tiene poco valor y simplemente aumenta la cantidad de cómputo requerido.

Luego de haber realizado evaluaciones utilizando cada proyección climática, se deben combinar los resultados en un 'conjunto' o media generalmente denominada el resultado principal, mientras que las diferentes evaluaciones individuales indican la cantidad de valores potenciales, y por consiguiente, imprecisión, de los resultados. Debe considerarse que no es recomendable combinar las proyecciones de los modelos climáticos en una proyección climática media de conjunto al principio y luego realizar una evaluación individual porque no suministrará ninguna perspectiva al intervalo de incertidumbre de los resultados. Dado que los diferentes modelos pueden generar patrones de circulación cualitativamente distintos, también pueden resultar en una proyección climática promedio del ensamble no realista desde el punto de vista de los mecanismos o físicamente imposible. Por ejemplo, se puede simular una característica principal de circulación atmosférica, como un frente persistente, una corriente en chorro o la trayectoria de vientos monzónicos a través de diferentes modelos para ocupar notablemente diferentes lugares geográficos, especialmente si una característica topográfica principal, como una cordillera, 'guía' la característica a un lado u otro de la misma. Al tomar una media de las dos simulaciones opuestas, esta tenderá a anular los patrones espaciales de las variables climáticas asociadas con la característica de circulación, como la pendiente espacial pronunciada de la temperatura asociada a un frente persistente o la concentración de la pluviosidad asociada a la trayectoria de los vientos monzónicos, produciendo patrones climáticos promedios que no son realistas desde el punto de vista de los mecanismos. Esto también podría cubrir la variación anual la cual puede ser un importante impulsor de la vulnerabilidad.

### 5.1.3.2 Escenarios de emisión

Resulta tentador promover la selección de escenarios de las emisiones de gases de efecto invernadero para representar un intervalo factible de futuros posibles; sin embargo, alternativamente, se puede promover la adopción del principio

de precaución. En respaldo del último enfoque, se ha evidenciado en los últimos 25 años que las emisiones han continuado, más o menos, por la trayectoria del peor escenario considerado factible por el IPCC en 1990 (Raupach et al., 2007). Por consiguiente, se puede afirmar que se debe tomar el peor de los escenarios factibles de emisiones (es decir, el más o menos correspondiente a la "normalidad") como base para la elaboración de la EVCC. Pese a que algunos pueden argumentar que este enfoque probablemente exagera los problemas que enfrentan generalmente las especies y la biodiversidad, las mejoras realizadas en los modelos climáticos durante el mismo período no han disminuido la magnitud de las discrepancias entre los cambios climáticos proyectados por los diferentes modelos aun bajo emisiones distintas. De hecho, en todo caso han aumentado los límites superiores del intervalo de imprecisión de las magnitudes del cambio climático futuro (Stainforth et al., 2005). Añádale el hecho confirmado que diferentes reacciones positivas claves del sistema climático, en particular, los efectos de la interacción de la vegetación nival sobre la reacción del albedo nival en latitudes más altas y la compleja reacción de suelo-humedad-vegetación-precipitación en las áreas semiáridas como el Sahel, no están adecuadamente representadas en los modelos climáticos actuales; por lo que el argumento para adoptar el principio de precaución al seleccionar los escenarios factibles de emisiones a utilizar en la elaboración de las EVCC es sólido.

Sin importar cuál es el enfoque adoptado para seleccionar los escenarios de emisiones, es importante incluir solo los que sean potencialmente realistas como los desarrollados en los últimos ~25 años por el IPCC. De ser posible, se debe preferir utilizar los escenarios de la Trayectoria Representativa de Concentración (RCP, por sus siglas en inglés) utilizados en el Quinto informe de evaluación del IPCC (IPCC, 2013a) por sobre los escenarios de SRES utilizados en el Cuarto informe de evaluación (IPCC, 2007b). Generalmente, los escenarios anteriores, IS92 y SA90, no se deben utilizar ya que la evidencia de que las emisiones que han surgido desde 1990 han sido cercanas al mayor escenario de "normalidad" del SA90 significa que el intervalo de emisiones que consideran no es realista.

El Quinto Informe de Evaluación del IPCC incluye cuatro trayectorias para las emisiones atmosféricas y el forzamiento radiativo en el siglo XXI: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5 (el forzamiento en W.m<sup>2</sup> determina el número de RCP procedentes). Más optimísticamente, el RCP 2.6 asume que las emisiones de gases de efecto invernadero son reducidas multilateralmente con efecto inmediato de tal manera que las concentraciones aumentarán y disminuirán para el año 2100 con una anomalía de temperatura media global que permanecerá por debajo de los 2 °C con respecto a los niveles preindustriales. Aunque es técnicamente factible (Vuuren et al., 2011), no es probable que ocurra esta trayectoria dadas las tendencias recientes. Los otros escenarios proyectan anomalías globales de temperatura media de hasta ~5 °C para el 2100. Con respecto a la anomalía de temperatura, los equivalentes más cercanos de SRES son B1 (RCP 4.5) y A1F1 (RCP 8.5) (Rogelj et al., 2012). Si no se adopta el principio de precaución, se recomienda la inclusión de al menos tres escenarios, estableciendo dos escenarios como



el mínimo absoluto a considerar, en cuyo caso deben representar el intervalo general de imprecisión factible sobre las emisiones futuras (es decir, un escenario de emisiones ‘alto’ y uno ‘bajo’, p.ej., RCP8.5 y RCP4.5). Si se adopta el principio de precaución, entonces se recomienda adoptar el escenario RCP8.5.

Al contrario de cuando se trabaja con modelos climáticos, casi siempre es inadecuado calcular cualquier tipo de promedio de conjunto de los resultados de EVCC para dos o más escenarios de emisiones. En cambio, se deben elaborar EVCC individuales para escenarios de emisiones alternativos para obtener información sobre la incertidumbre de la EVCC relacionada con las de emisiones futuras. Existe una diferencia fundamental entre esta imprecisión relacionada con los factores desconocidos que influenciarán el crecimiento futuro de la población humana, los estándares de vida y la economía mundial, las políticas energéticas, entre otras y la relacionada a diferentes modelos climáticos la cual a su vez surge de las limitaciones de la ciencia climática, las diferencias en la formulación de los modelos y la necesidad de simplificar los sistemas de los mismos.

### 5.1.3.3 Conjuntos de datos históricos (referencia)

En la **Tabla 8** se muestran los conjuntos de datos más utilizados que representan las observaciones climáticas de referencia y tres conjuntos de datos de pluviosidad derivados de satelitales que tienen uso potencial. La elección del conjunto de datos dependerá de la extensión espacial y el tamaño del grano en el que se realizará la EVCC, tal como se señala en la Sección 5.1.1 (Extensión espacial y resolución), así como del período más apropiado con respecto al tiempo de recolección de datos de las especies. Concretamente, cuando se requieren valores climáticos promedio para períodos “personalizados”, la mejor opción disponible para

Los peces payasos (familia: Pomacentridae) tienen relaciones cercanas con las anémonas de mar y dependen de ellas para protegerse. Se cree que los peces payasos ubican su anémona de mar huésped particular utilizando el sentido del olfato, pero los exámenes de laboratorio sugieren que este sentido pudo haber sido afectado por el aumento de la acidez del agua oceánica. Además, tanto los peces payasos como las anémonas de mar dependen de los arrecifes de coral como hábitat por lo que también están indirectamente amenazadas por el blanqueamiento y los impactos que la acidificación del océano tiene sobre ellos. © Flickr - Alfonso Gonzalez



utilizar es el conjunto de datos 0,5° CRU TS3.22 (Harris et al., 2014) de promedios mensuales para el período de 1901–2014, complementado, de ser apropiado, con los datos de pluviosidad y/temperatura de uno de los conjuntos de datos satelitales (solo décadas recientes). En el caso de conjuntos de datos basados en los registros climáticos observados en estaciones meteorológicas del mundo, es importante reconocer que existen pocas de estas estaciones en el mundo en desarrollo, especialmente en los trópicos (p.ej., en el Sahara y África tropical) y éstas son mucho más escasas en las zonas del mundo que presentan mayores elevaciones; por lo que las proyecciones que se realicen para tales regiones utilizando estos conjuntos de datos de referencia están sujetas a mayor incertidumbre.

### 5.1.3.4 Variables bioclimáticas

Se debe ajustar la selección de las variables bioclimáticas a utilizar en una EVCC según la especie focal. Aunque existen algunas especies para las que se han identificado las variables bioclimáticas precisas que son importantes y/o sus mecanismos de acción (p.ej., Pigott & Huntley, 1981), la base para realizar una selección informada e inteligente de las variables bioclimáticas para la mayoría de las especies es el conocimiento biológico general acumulado de diferentes grupos taxonómicos y regiones climáticas y los resultados de muchos estudios con modelos ajustados de acuerdo a las especies y el clima de diferentes tipos. Como regla general, a pesar de los muchos estudios en los que se ha utilizado, la temperatura promedio anual no es importante desde el punto de vista mecanicista (Huntley, 2012; Platts et al., 2013b). Por el contrario, los promedios de los meses más fríos y/o cálidos o los extremos anuales (cuando estén disponibles) y las sumas térmicas anuales por encima o debajo de los umbrales relevantes tienen funciones mecanísticas claras para determinar el rendimiento y/o la supervivencia de las especies de un intervalo amplio de grupos taxonómicos. También puede ser útil incluir especies o medidas específicas de los taxones relacionadas con períodos particulares de alta sensibilidad a las condiciones climáticas como la temporada reproductiva (Pearce-Higgins et al., 2015).

De manera similar, aunque se han utilizado con frecuencia los valores promedios de pluviosidad anuales o estacionales, existe poca, de haber alguna, evidencia de que la cantidad de precipitación sea importante, desde el punto de vista mecanicista, para alguna especie. En cambio, las especies de plantas superiores responden principalmente al equilibrio entre las precipitaciones y la evaporación, estacional o anual, medido a través de la resta de las medidas de precipitación menos las de evaporación (P–E) o el cociente de la evapotranspiración real a potencial (AET/PET). En contraste, los miembros de otros grupos taxonómicos pueden ser influenciados principalmente por la distribución de las precipitaciones durante el año (p.ej., número de días de lluvia o húmedos). Por ejemplo, muchos anfibios, hepáticas frondosas y helechos necesitan que su piel o follaje permanescan húmedos, mientras que otros insectos que presentan períodos de hibernación se pueden ver negativamente afectados por las condiciones húmedas que promueven los ataques de hongos (Conrad et al., 2003). Otras variables son solo importantes bajo ciertos regímenes climáticos o para ciertas especies. Por ejemplo, en las regiones tropicales que son temporalmente áridas, la intensidad de la temporada de

sequía o humedad es muchas veces extremadamente importante, mientras que para muchas especies boreales y árticas es importante la profundidad estacional de la nieve, para la que el equivalente de agua de nieve (SWE, por sus siglas en inglés) proporciona un indicador apropiado y amplio. Aunque las interacciones entre las especies pueden causar una alteración en los impactos del cambio climático, es interesante notar que las medidas climáticas que son importantes para los niveles tróficos más bajos también afectan las poblaciones y distribuciones de los depredadores superiores (ejemplo, Huntley et al., 2008; Pearce-Higgins et al., 2015).

Para algunos taxones no existe información específica disponible que permita guiar la selección de variables bioclimáticas. En el caso de las especies tropicales, la mejor opción predeterminada es combinar las temperaturas promedio del mes más frío y más cálido, la tasa anual de evapotranspiración real a potencial y la medida de la intensidad de la temporada de sequía/humedad. También pueden ser apropiadas las medidas de dos temporadas (es decir, medidas de dos temporadas de lluvias en un año) (p.ej., tasa de disponibilidad de agua en la temporada menos lluviosa a la más lluviosa, duración de la temporada de sequía más larga). Para las especies de áreas templadas, la mejor opción predeterminada de variables bioclimáticas sería, como mínimo, la temperatura media del mes más frío, la suma térmica anual por encima de los 5 °C y la tasa anual de evapotranspiración real a potencial. Para algunas

especies de temperaturas frías que requieren “enfriamiento” puede ser importante incluir, como variable adicional, una medida de la duración del período con temperaturas por debajo de 0 °C o la suma térmica anual (negativa) por debajo de 0 °C. En el caso de las especies árticas y boreales, se puede añadir el equivalente de agua de nieve (SWE) y para las especies de latitudes más altas, se puede sustituir la suma térmica anual por encima de 0 °C por la de por encima de 5 °C.

Es importante notar que los modelos correlativos con alta bondad de ajuste y/o importancia estadística pueden ser ajustados, y con frecuencia han sido, utilizando variables climáticas sin relevancia desde el punto de vista de los mecanismos. Tales ajustes generalmente reflejan correlaciones entre las variables relevantes desde el punto de vista mecanicista y las irrelevantes utilizadas en el modelo. Sin embargo, estas correlaciones no son persistentes en el espacio, ya que se mueven de un régimen climático a otro (consulte el ejemplo, Huntley, 2012; Dormann et al., 2013; Huntley et al., 2014), ni se puede esperar que lo sean en el tiempo a medida que cambian los patrones climáticos. Como resultado, los modelos que se ajustan utilizando variables inapropiadas con frecuencia producen proyecciones inexactas de climas futuros. Es por esto que es extremadamente importante intentar, en la medida de lo posible, identificar y utilizar solo variables que posean funciones mecanicistas factibles.

**Tabla 8.** Ejemplos de los conjuntos de datos climáticos más utilizados y generalmente disponibles que representan las condiciones climáticas históricas (de referencia o pasado reciente).

Nombre del conjunto de datos	Extensión espacial	Extensión temporal	Resolución espacial	Datos disponibles en: (URL)
<b>Conjuntos de datos que utilizan información de estaciones meteorológicas interpolados con la longitud, latitud y elevación</b>				
CRU CL v.2.1 (Mitchell et al., 2004)	Europa	1961–90 (promedios de 30 años)	10 minutos (~18,4 x 18,6 km = 342km <sup>2</sup> )*	Disponible a solicitud
CRU TS v.3.22 (Harris et al., 2014)	Global	1901–2013 (datos anuales)	0,5 grados (~55 x 56km = 3077km <sup>2</sup> )*	<a href="http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/">http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/</a>
WorldClim (Hijmans et al., 2005)	Global	1950–2000 (promedios del período)	30 segundos (~922 x 928m = 0,855km <sup>2</sup> )*	<a href="http://www.worldclim.org/">http://www.worldclim.org/</a>
Prism (Daly et al., 2002)	Estados Unidos	1895–en proceso	30 segundos (~922 x 928m = 0,855km <sup>2</sup> )*	<a href="http://prism.oregonstate.edu/">http://prism.oregonstate.edu/</a>
<b>Conjuntos de datos que utilizan información remota satelital, normalmente procesada a través de algún modelo que con frecuencia incluye la asimilación de datos de estaciones meteorológicas</b>				
CHIRPS v2.0 (Funk et al., 2014)	50°S–50°N (Solo pluviosidad)	1981–presente (datos diarios, de 10 días, mensuales y anuales)	0,05 grados (~5,5 x 5,6 km = 30,8 km <sup>2</sup> )*	<a href="http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/#plus7">http://chg.geog.ucsb.edu/data/chirps/#plus7</a>
Temperatura de la superficie terrestre/emisividad global de MODIS	Global	Marzo 2000 -presente (datos diarios, de 8 días, mensuales)	1 km a 0,05 grados	<a href="http://modisland.gsfc.nasa.gov/temp.html">http://modisland.gsfc.nasa.gov/temp.html</a>
TAMSAT/TARCAT v2.0 (Maidment et al., 2014; Tarnavsky et al., 2014)	África (Solo pluviosidad)	1983–presente (Datos de 10 días, mensuales y estacionales)	0,0375 grados (135 segundos) (~4,15 x 4,17 km = 17,3 km <sup>2</sup> )*	<a href="http://www.met.reading.ac.uk/~tamsat/cgi-bin/data/rfe.cgi?type=clim">http://www.met.reading.ac.uk/~tamsat/cgi-bin/data/rfe.cgi?type=clim</a>
TRMM/3B42	50°S–50°N (Solo pluviosidad)	Marzo 2000–presente (Datos diarios, de 10 días y de 30 días)	0,25 grados (27,6 x 27,8 km = 769 km <sup>2</sup> )	<a href="http://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm">http://pmm.nasa.gov/data-access/downloads/trmm</a>

\*Promedio cerca al Ecuador

CRU: Unidad de Investigación Climática

Como regla general, no se puede utilizar más de una variable bioclimática por cada registro de incidencia o cuadrículas de “presencia” de cinco especies (IUCN SSC Standards and Petitions Subcommittee, 2016). Esto evita el riesgo a que el modelo se “sobreajuste”, lo cual ocurre cuando modelos altamente complejos comienzan a describir o ‘ajustar’ errores o ruidos aleatorios, en vez de las relaciones entre variables significativas. Algunos métodos correlativos (p.ej., Maxent y Árboles de Regresión Impulsados) seleccionan automáticamente un número parsimonioso de variables por lo que los usuarios no deben preocuparse por suministrar demasiadas variables bioclimáticas. Sin embargo, especialmente con estos métodos, cuando los algoritmos seleccionan las variables con base en su contribución/poder estadístico, es muy importante que solo se incluyan en el grupo general las que sean al menos relevantes desde el punto de vista de los mecanismos biológicos. En los casos en los que se debe seleccionar un número limitado de variables y existan varias posibilidades, se recomienda investigar las correlaciones entre ellas (p.ej., a través de un Análisis de Componentes Principales) y seleccionar un número reducido de variables desvinculadas y así reducir los problemas potenciales por colinealidad (Araújo & Guisan, 2006; Dormann et al., 2013) o condensar los diferentes indicadores correlacionados en ejes de PCA ortogonales (p.ej., Loarie et al., 2008).

#### 5.1.3.5 Entendiendo y preparando escenarios climáticos futuros

Se pueden utilizar modelos climáticos, ya sean Modelos de Circulación General, de Circulación Regional o del Sistema Terrestre para simular las condiciones climáticas pasadas, presentes o futuras. Sin embargo, en todos los casos se obtendrán cálculos sesgados de las variables climáticas porque ningún modelo es una representación completa y precisa del sistema climático. Por lo tanto, es necesario realizar ciertos pasos mínimos para eliminar o reducir los márgenes de error.

El enfoque más común para esto es asumir que los sesgos no cambiarán cuando se utilice el modelo para simular un clima alterado y que cualquier cambio de las condiciones entre una simulación del modelo del clima presente y de algunos climas alterados será robusto. De este modo, los escenarios de cambio climático para la elaboración de EVCC se preparan mejor, primero, utilizando simulaciones de modelos del clima ‘presente’ y del clima alterado del período futuro seleccionado para calcular los cambios o ‘anomalías’ proyectadas en las variables climáticas de interés. En este caso, ‘presente’ se refiere al período cubierto por el conjunto de datos climáticos de referencia. Luego se combinan los cambios o anomalías con el conjunto de datos de referencia para obtener el escenario requerido de condiciones climáticas futuras. Este procedimiento de ‘factor de cambio’ o ‘delta’ para abordar los márgenes de error de los modelos climáticos al desarrollar escenarios climáticos futuros para los estudios de impacto está bien establecido y ha sido descrito, en diferentes ocasiones, en la literatura sobre el uso de modelos correlativos para la proyección de distribuciones futuras potenciales de especies (ejemplo, Huntley et al., 1995, 2006, 2007) y sobre el desarrollo de escenarios de cambio climático a escala espacial para varias regiones (ejemplo, Ramírez-Villegas & Jarvis, 2010; Tabor & Williams, 2010; Platts et al., 2015); los cuales se detallan a continuación.

Los usuarios pueden preferir seleccionar las proyecciones de listas de conjuntos de datos climáticos disponibles, pero al hacerlo deben asegurarse de que hayan sido establecidas utilizando los métodos apropiados. Alternativamente, los usuarios quizás deban realizar los siguientes pasos. En cualquier caso, es importante entender cómo se utilizan los resultados de modelos climáticos y los datos climáticos de referencia para obtener escenarios climáticos futuros.

#### *Paso 1. Calcular los cambios o anomalías proyectadas a través de resultados de modelos climáticos*

Se calculan las “anomalías” o “campos de cambio” para cada variable climática de interés, a fin de obtener el grado de cambio proyectado por un modelo climático para un escenario de emisiones y período particular. Generalmente, las anomalías son calculadas como el cambio entre las simulaciones del modelo de los valores promedios de las variables climáticas en el ‘presente’ (preferiblemente, el mismo período que comprende el conjunto de datos de referencia en el que se aplicará las anomalías) y en el período futuro seleccionado y son calculadas para cada variable climática de interés y para todas las cuadrículas de modelo relevante para el área en cuestión.

En el caso de las variables de temperatura, normalmente se calculan las anomalías como la diferencia aritmética entre los valores futuros y los ‘presentes’ (es decir, anomalías aditivas; p.ej., si la temperatura promedio de julio ‘presente’ de una célula es de 20 °C y el valor futuro proyectado es de 22 °C, la anomalía será de +2 °C). En el caso de las variables relacionadas con la pluviosidad, las anomalías aditivas, aunque algunas veces se utilizan (Tabor & Williams, 2010), generalmente no se recomienda su uso porque los modelos climáticos muchas veces tienen sesgos consistentes de ‘humedad’ o ‘sequía’ que producen grandes diferencias en los cambios de precipitación absoluta entre modelos. Esto se puede evitar calculando las anomalías como el cociente de la precipitación del futuro al ‘presente’ (es decir, anomalías multiplicativas; p.ej., si la simulación de dos modelos de la precipitación promedio ‘presente’ de enero de una célula es de 200 mm y 100 mm, y los valores futuros simulados proyectados son de 300 mm y 150 mm, la anomalía será de 1,5 en ambos casos, mientras que las anomalías aditivas serían de 100 mm y 50 mm, respectivamente). Surgen problemas cuando el valor de la precipitación futura proyectada es exactamente cero. Esto se puede solventar sumando una pequeña cantidad (p.ej., 1 mm) tanto a los valores ‘presentes’, como futuros (Ramírez-Villegas & Jarvis, 2010; Platts et al., 2015). Dado que todos los modelos climáticos difieren en sus sesgos inherentes, se deben calcular las anomalías para cada modelo por separado, así como para cada escenario de emisiones y período considerado.

#### *Paso 2. Combinar las anomalías con los datos de referencia para obtener el escenario climático futuro*

Luego de haber obtenido los campos de anomalías, el segundo paso es usarlos para calcular los escenarios climáticos futuros aplicando las anomalías relevantes a los datos climáticos de referencia, ya sea sumando o multiplicando, tal como se describió anteriormente. En la Sección 5.1.1 (Extensión espacial y resolución) anterior discutimos la selección de los datos climáticos de referencia en un grano adecuado. Si, como es posible que ocurra, el grano del modelo climático y por ende, las anomalías resultantes son más

amplias que el del conjunto de datos de referencia seleccionado para la EVCC, es necesario reducir la escala de las anomalías como sea pertinente para obtener valores aplicables a los datos de referencia. La reducción de escala normalmente se realiza ajustando estadísticamente superficies continuas o "splines" a las anomalías, en longitud y latitud y utilizándolas para obtener valores interpolados para las celdas de la cuadrícula en cuestión. Generalmente, se prefiere este enfoque a la interpolación bilineal o de ponderación de distancia de los valores de anomalía de las cuadrículas de modelo climático circundantes a la cuadrícula objetivo en los datos observados, debido a las grandes diferencias de los granos y la inconveniencia de la hipótesis de que las anomalías varían espacialmente de manera lineal.

Con respecto a la reducción espacial de la escala, vale la pena enfatizar que el método de factor de cambio descrito aquí asume inmovilidad temporal de los patrones espaciales de variación climática, tal como inferen los datos climáticos de referencia de mayor resolución. Por ejemplo, en una cuadrícula de RCM y dependiendo de la contribución de la altitud a la interpolación anterior, la hipótesis de inmovilidad asume que se conservarán los patrones presentes de cambio de temperatura con la altura o la variación de la pluviosidad por las interacciones entre la orientación de las laderas montañosas y la dirección del viento predominante. Esta hipótesis de inmovilidad temporal de los patrones espaciales locales probablemente sea válida a menos que el GCM simule cambios (p.ej., cambios de posición, fuerza, orientación) en las características principales de la circulación atmosférica y/u oceánica que influyen considerablemente el clima de la región de interés. Sin embargo, aún en esos casos, hasta que tales simulaciones climáticas globales no se encuentren disponibles en una resolución tan alta o más que la alcanzada por los RCM, esta hipótesis generalmente será el enfoque más práctico y pragmático.

En las regiones con series temporales de datos climáticos suficientemente densas, una alternativa al enfoque de reducción de escala de factor de cambio es correlacionar directamente los resultados de RCM con las condiciones climáticas locales en el tiempo (reducción estadística) y utilizar esas relaciones para proyectar los cambios a escalas más pequeñas, corrigiendo, donde sea pertinente, los cambios de escenario de las respuestas de tierra-superficie (p.ej. cambio de la base de nubes hacia la cima debido a la deforestación) o de la regulación microclimática proporcionada por la vegetación y la cubierta de nieve. Esta reducción estadística de la escala se basa en el supuesto de que las relaciones entre la climatología a escala más pequeña y las características del sistema climático a menor resolución persistirán bajo condiciones climáticas generales diferentes; esto no se ha sido puesto a prueba y es improbable.

#### 5.1.4 Datos de distribución de las especies

Es particularmente importante para los enfoques de EVCC que se basan en gran medida en los registros de incidencia para caracterizar las tolerancias climáticas de las especies (es decir, los enfoques de elaboración de modelos climáticos de nicho correlativos y mecanistas), que los datos sean de buena calidad (IUCN SSC

Standards and Petitions Subcommittee, 2016). Los registros de presencia deben incluir los lugares precisos, la precisión espacial aceptable la cual será determinada por la resolución espacial en la que se realizará la EVCC (p.ej., se requerirán ubicaciones exactas con precisión de  $\leq 100\text{m}$  para un análisis con resolución de  $1\text{ km}^2$ ). Se debe especificar la proyección (p.ej., WGS84), a fin de obtener mayor precisión. Con frecuencia, identificar registros espaciales imprecisos es difícil, pero existen dos procedimientos que pueden ayudar. Primero, realizar un mapa de los registros (en un SIG o Google Earth) permitirá la identificación e investigación de los registros anómalos o periféricos (Pearson, 2007). También puede ser útil compararlos con los polígonos de distribución realizados por expertos (consulte la **Tabla 6** para obtener ejemplos de las fuentes) o mapas publicados, cuando existan disponibles, pero se debe tener cuidado de no eliminar registros precisos innecesariamente, solo porque se encuentran ubicados fuera de los polígonos de distribución. De estar disponibles, los datos de una investigación de buena calidad o atlas o un conjunto de registros bien validados serán probablemente más precisos y útiles que un polígono basado en expertos. Segundo, en los casos en los que los registros incluyan la altitud, longitud y latitud, superponer la ubicación de la longitud y latitud con un DEM de alta resolución permite verificar la consistencia de la altitud. En el caso de los registros en los que la superposición de la altitud sea deficiente, se puede investigar o rechazar.

Puede existir mayor incertidumbre en el análisis si los datos de presencia son sesgados desde el punto de vista espacial. Muchos conjuntos de datos, por ejemplo, tendrán mayores densidades de registros de las áreas que se encuentran cerca de poblaciones humanas o caminos. Esto puede sesgar considerablemente el muestreo del espacio ambiental y producirá modelos inexactos. Sin embargo, si se puede recolectar información sobre los sesgos del muestreo, entonces la selección adecuada de los datos ausentes pueden permitir que los enfoques de elaboración de modelos climáticos consideren tales sesgos (consulte Phillips et al., 2009). Cuando esto no sea posible, se pueden utilizar otros métodos para eliminar los sesgos como aclareo (submuestrear los registros) en el espacio geográfico (Aiello-Lammens et al., 2015) o ambiental (Varela et al., 2014) o ponderar las presencias por el inverso de su densidad local (Stolar & Nielsen, 2015).

Se debe minimizar la incertidumbre en la identificación. Para taxones menos conocidos o difíciles de identificar, lo ideal sería asociar los registros de incidencia con evidencias físicas de los ejemplares o, de ser apropiado, fotografías que hayan sido identificadas por importantes expertos taxonómicos, aunque los enfoques de elaboración de modelos climáticos permiten cada vez más la consideración de la imprecisión en la identificación de los registros (Johnston et al., 2015). Se puede utilizar la información de grandes conjuntos de datos de distribución (p.ej., GBIF, HerpNet), pero solo con precaución y realizando una revisión cuidadosa de la precisión, cobertura e intensidad del muestreo (IUCN SSC Standards and Petitions Subcommittee, 2016). Aunque existe inquietud sobre la validez de los registros que se obtienen de los enfoques de ciencia ciudadana (p.ej., e-Bird, BirdTrack, SABAP), en la práctica, estos sistemas muchas veces representan la única manera práctica de obtener datos de



registros biológicos a gran escala y extensivos, pero se recomienda incluir mecanismos de verificación a fin de garantizar que los registros inusuales sean revisados por evaluadores y registradores experimentados. Estos datos han respaldado la mayoría de las evaluaciones de distribución y cambio de área de distribución proyectado para muchas especies de aves (Huntley et al., 2008).

*Más detalles sobre este tema se presentan a continuación en la Sección 6.1 (Incertidumbre de los datos de distribución y abundancia de las especies).*

### 5.1.5 Datos de rasgos de las especies

Cada vez más, existe mayor reconocimiento y comprensión de la función de las características biológicas de las especies para exacerbar o mitigar la sensibilidad y la capacidad de adaptación al cambio climático (Jiguet et al., 2007; Dawson et al., 2011; Nicotra et al., 2015). Estas incluyen los rasgos relacionados con la fisiología, demografía y ecología de las especies (Keith et al., 2008; Visser, 2008; Williams et al., 2008). Los estudios que examinan las asociaciones entre los rasgos biológicos y los cambios producidos por el cambio climático en la abundancia de la población, riesgo de extinción y cambios de área de distribución de un taxón contribuyen a aumentar la base de conocimientos (p.ej., Cardillo et al., 2008; Murray et al., 2009; Thaxter et al., 2010; Angert et al., 2011; Newbold et al., 2013; Chessman, 2013; Pearson et al., 2014a; Estrada et al., 2015). Estas asociaciones de rasgos proporcionan la base para el uso de los rasgos en las EVCC y presentan, en esta etapa, una de las pocas maneras de considerar las diferentes formas en las que el cambio climático puede afectar a las especies. Están siendo adoptados por muchas organizaciones para la conservación, dado que requieren conocimiento ecológico sin gran experiencia estadística o en elaboración de modelos climáticos y especialmente porque posibilitan la realización de evaluaciones para grandes números de especies con relativa rapidez. Varias EVCC recientes han adoptado el enfoque basado en rasgos para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático de las especies a nivel regional (Gardali et al., 2012; Trivino et al., 2013) o global (Foden et al., 2013). En la Sección 6.5 (Incertidumbre de los rasgos biológicos y los datos demográficos), discutimos la aplicación de este enfoque y algunos de sus desafíos e imprecisiones.

#### 5.1.5.1 Selección de los rasgos

Hasta la fecha, la selección de rasgos para los modelos basados en rasgos y mecánicos ha sido en gran medida basada en el conocimiento de expertos, basándose en hipótesis a priori sobre los mecanismos por los que probablemente serán afectadas las especies focales. En la **Tabla 9** se muestra un ejemplo para guiar la selección de rasgos y en la **Tabla 10**, se muestran ejemplos de los tipos de rasgos utilizados en cinco EVCC recientes basados en rasgos. Dado que este enfoque basado en el conocimiento de los expertos puede implicar ciertos sesgos (Burgman et al., 2011), particularmente en combinación con las omisiones de ciertos rasgos por la disponibilidad y la recolección de datos, alentamos a los usuarios a investigar la justificación de sus opciones de rasgos, rasgos o mecanismos deseados que se omiten y de ser posible, considerar la incertidumbre en las evaluaciones a través de análisis de sensibilidad.

Un requisito clave para implementar el enfoque basado en rasgos es tener una base de datos de los rasgos de las especies. Tal información está siendo recolectada, cada vez más, para muchos grupos taxonómicos y están disponibles en varias fuentes de datos y organizaciones (consulte la **Tabla 6** y la Sección 4.1, Paso 3 (Datos de rasgos de las especies)). Sin embargo, falta esta información para muchas especies, particularmente para los taxones menos estudiados, y su obtención depende de la evaluación basada en el conocimiento de expertos o potencialmente, del uso de datos de especies similares. Esta flexibilidad hace que el uso de las evaluaciones basadas en rasgos sea atractivo, dado que se pueden realizar para cualquier especie y ubicación si se tiene a disposición una base de datos de rasgos, o diferentes expertos de las especies.

#### 5.1.5.2 Selección de los umbrales de características

El cálculo de los umbrales para categorizar la vulnerabilidad al cambio climático relacionada con cada rasgo seleccionado representa un gran desafío para la mayoría de los métodos a base de rasgos. Los umbrales de interés son claros para algunos rasgos (p.ej., la limitación a una pequeña isla), pero dado que la mayoría de los rasgos son descritos a través de variables continuas (p.ej., masa corporal, fecundidad, grado de especialización de hábitat), los usuarios deben inferir tales umbrales. En casos inusuales, existen estudios empíricos disponibles con estimaciones robustas de estos umbrales (p.ej., curvas del ritmo de crecimiento y tolerancias térmicas establecidas para la *Drosophila australiana* (Overgaard et al., 2014)), pero en la mayoría de los casos, los usuarios deben hacer selecciones subjetivas basadas en sus propias observaciones y comprensión ecológica o hasta de manera arbitraria (p.ej., el 25% de las especies más afectadas, (Foden et al., 2013)). Estos desafíos destacan la necesidad de realizar un mayor número de estudios empíricos sobre los límites fisiológicos de las especies.

#### 5.1.5.3 Calificando los rasgos

Las evaluaciones basadas en rasgos realizadas hasta la fecha tienden a calcular la vulnerabilidad individual al cambio climático de las especies relacionada con cada rasgo en una de tres maneras. Se han asignado calificaciones a las especies para cada rasgo (p.ej., de -1 a 1 (Bagne et al., 2011), 1 a 3 (Gardali et al., 2012) o 0-3 (Thomas et al., 2011), **categorías ordinales** (p.ej., “Alto/Medio/Bajo” (Chin et al., 2010) o “Alto/Bajo” (Foden et al., 2013)); o **rangos** (p.ej., de acuerdo al marco jerárquico de decisión (Smith et al., 2016)).

- i) Hasta la fecha se le ha dado muy poca atención a los **sistemas de calificación** y la manera en que se combinan las calificaciones (Willis et al., 2015), pero repercuten considerablemente en los resultados generales del enfoque de TVA. Una serie preliminar sobre las “mejores prácticas” para desarrollar un sistema de calificación incluye los siguientes aspectos:
- ii) **El número de graduaciones del sistema de calificación debe reflejar la cantidad de información disponible sobre los rasgos.** Por ejemplo, una escala más pequeña (p.ej., 0 a 10) permite una distinción más matizada entre los estados de los rasgos que una escala más amplia (p.ej., alto/medio/bajo). Aunque conceptualmente es más fácil completar un sistema de calificación con menos graduaciones, las escalas más amplias generalmente requieren más reflexión coordinada sobre los umbrales críticos dada que la diferencia entre cualquier par de

**Tabla 9. Categorías de rasgos asociadas con la elevada sensibilidad y poca capacidad de adaptación de las especies al cambio climático** (tomado de Foden et al., (2013) y Estrada et al. (2016)). Los evaluadores pueden elegir para sus especies focales uno o más de los rasgos descritos en cada categoría (p.ej., en la categoría D, para los corales, los usuarios pueden seleccionar “susceptible al blanqueo”).

## SENSIBILIDAD

### A. Requisitos de hábitat y/o microhábitat especializados

A medida que se desarrollan los cambios ambientales causados por el cambio climático, las especies que se encuentran menos acopladas a condiciones y requisitos específicos tienden a ser más resilientes porque tendrán un intervalo de opciones más amplio de hábitats y microhábitats disponible. La sensibilidad aumenta para las especies con diferentes etapas de vida en las que requieren distintos hábitats o microhábitats (p.ej., los anfibios en estados larvarios dependientes al agua). Sin embargo, notamos que esto no aplica a todos los casos y la especialización extrema puede permitir que algunas especies escapen de los impactos de la exposición al cambio climático (p.ej., peces de aguas profundas).

### B. Las tolerancias o umbrales ambientales (en diferentes etapas de vida) con probabilidades de ser excedidos por el cambio climático

Las especies con tolerancias fisiológicas vinculadas a condiciones ambientales específicas (p.ej., regímenes de temperatura o precipitación, pH o niveles de oxígeno del agua) serán particularmente sensibles al cambio climático (p.ej., ectotermos tropicales) (Deutsch et al., 2008; McCain, 2009). Sin embargo, hasta las especies con amplias tolerancias ambientales ya pueden encontrarse cerca de los límites de los umbrales en los que sus funciones fisiológicas se degradan rápidamente (Foden et al., 2007)).

### C. Dependencia a desencadenantes ambientales que probablemente serán alterados por el cambio climático

Muchas especies dependen de desencadenantes o señales ambientales para iniciar etapas de vida (p.ej., la migración, reproducción, puesta de huevos, germinación de semillas, hibernación y aparición en primavera). Aunque algunas señales como la duración del día y los ciclos lunares no serán afectadas por el cambio climático, aquellas que son impulsadas por el clima y la estacionalidad pueden alterar su temporalidad y magnitud generando asincronía y desacoplamiento con los factores ambientales (Thackeray et al., 2010) (p.ej., desfases entre los máximos de disponibilidad de alimentos en primavera y las fechas de incubación (Both et al., 2006)). La sensibilidad al cambio climático probablemente se agrava cuando los sexos o las diferentes etapas de vida dependen de señales distintas.

### D. Dependencia de interacciones interespecíficas que probablemente serán alteradas por el cambio climático

Las alteraciones en el área de distribución, las fenologías y las abundancias relativas de las especies causadas por el cambio climático pueden afectar sus interacciones interespecíficas favorables (p.ej., con presas, polinizadores, huéspedes y simbioses) y/o las que pueden causar disminuciones (p.ej., con depredadores, competidores, patógenos y parásitos). Las especies son particularmente sensibles al cambio climático si son altamente dependientes de una o varias especies de recursos específicos que no se pueden sustituir por otras especies (Møller et al., 2011).

### E. Rareza

La vulnerabilidad inherente de las poblaciones pequeñas a los efectos de Allee y a los eventos catastróficos, al igual que su capacidad, generalmente reducida, a recuperarse rápidamente después de eventos de extinción locales, sugieren que muchas especies inusuales serán más sensibles al cambio climático que las especies comunes. Las especies inusuales incluyen aquellas con tamaños poblacionales muy pequeños y las que pueden ser abundantes localmente pero muy limitadas geográficamente.

## POCA CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN

### F. Habilidad deficiente de dispersión:

Límites intrínsecos para la dispersión: las especies con tasas bajas de dispersión o bajo potencial para la dispersión en distancias largas (p.ej., caracoles de tierra, hormigas y plantas dispersadas por lluvias) tienen una baja capacidad de adaptación ya que no pueden soportar el cambio climático.

Estrada et al. (2016) describen un marco conceptual destacando cómo cuatro procesos claves asociados a la capacidad de cambiar el área de distribución se asocian a siete tipos de rasgos, a saber (con rasgos entre paréntesis): (i) **emigración** (fidelidad al lugar); (ii) **movimiento** (habilidad para moverse); (iii) **asentamiento** (evasión de efectos de poblaciones pequeñas, persistencia en condiciones desfavorables) y (iv) **proliferación** (estrategia reproductiva; generalización ecológica y habilidad competitiva (estas tres características aplican a los procesos (iii) y (iv))).

Límites extrínsecos para la dispersión: aun en los lugares en los que las especies son intrínsecamente capaces de dispersarse largas distancias o rápidamente, se puede reducir su capacidad de movimiento y/o colonización exitosa debido a la baja permeabilidad o a la existencia de barreras físicas en las rutas de dispersión. Estas incluyen barreras naturales (p.ej., océanos o ríos para las especies terrestres), barreras antropogénicas (p.ej., diques para especies de agua dulce) y hábitats o condiciones inadecuadas (p.ej., corrientes oceánicas y variaciones de temperatura para las especies marinas). También se pueden considerar en este conjunto de características las especies que permanecerán sin hábitat o “espacio climático” adecuado (p.ej., las especies árticas que dependen del hielo).

### G. Capacidad deficiente de evolución:

El potencial de las especies para cambiar genéticamente con rapidez determinará si puede ocurrir la adaptación evolutiva a una tasa suficiente como para soportar los efectos del cambio climático en sus entornos. Las especies con baja diversidad genética, con frecuencias indicadas por la disminución reciente de sus poblaciones, generalmente presentan intervalos más bajos de variación fenotípica y genotípica. En consecuencia, estas especies tienden a tener menos características nuevas que podrían facilitar su adaptación a las nuevas condiciones climáticas.

Dado que existen pocas medidas directas para la diversidad genética de las especies, podrían ser útiles las medidas indirectas de su capacidad de evolución como las relacionadas a las tasas reproductivas y por ende, la tasa en la que se pueden acumular los nuevos genotipos favorables en las poblaciones y especies (Chevin et al., 2010). La evidencia sugiere que la adaptación evolutiva es posible en períodos relativamente cortos (p.ej., de 5 a 30 años (Bradshaw & Holzapfel, 2006)) pero para la mayoría de las especies con generaciones largas (p.ej., animales grandes y muchas plantas perennes), este proceso será probablemente muy lento como para tener algún efecto serio para minimizar los impactos del cambio climático.

calificaciones es mayor (p.ej., en un sistema de calificación de cero a diez, la diferencia relativa entre una calificación de 6 y una de 7 es menor, mientras que en una escala de bajo-medio-alto de 3 puntos la diferencia entre “alto” y “medio” o entre “medio” y “bajo” es mucho mayor). Independientemente del sistema de calificación, los evaluadores deben documentar claramente los umbrales de rasgos seleccionados y suministrar sus justificaciones, en la medida de lo posible.

- iii) **El sistema de calificación debe incluir una calificación “neutral” por encima/debajo de la cual se espera que el cambio climático sea dañino/beneficioso para una especie.** Aunque se espera que el cambio climático altere a gran escala las ecologías de las especies, no todos sus efectos serán necesariamente negativos; algunas especies serán beneficiadas. Es por esto que es importante reflejar este potencial en el sistema de calificación y evitar asumir que el cambio climático solo afectará a las especies negativamente. Aún cuando ninguna especie incluida en una evaluación se beneficiará realmente o no sufrirá ningún impacto del cambio climático, las calificaciones neutrales sirven como punto de referencia mental para presentar las calificaciones de un estado significativo (un estado de no efecto). También permiten comparar más fácilmente los estudios ya que sirven como denominador común entre diferentes sistemas de calificaciones. La inclusión de calificaciones neutrales es considerada una práctica estándar de los campos en los que se utilizan sistemas de calificación como base del análisis (Ragin & Becker, 1992).
- iv) **Los evaluadores deben recolectar y almacenar los datos de tal forma que se pueda realizar reevaluaciones** en caso de que cambie la comprensión de los mecanismos del cambio climático que sustentan la selección del umbral de los rasgos. La ciencia climática y la evaluación de vulnerabilidad son campos que avanzan rápidamente. Aunque se están tomando decisiones importantes para períodos de muchas décadas en el futuro, todos los años aumenta nuestra comprensión sobre

las consecuencias del cambio climático. Por consiguiente, es probable que un programa activo de gestión necesite actualizar sus evaluaciones a medida que pasa el tiempo (y aumenta nuestro conocimiento sobre las posibles respuestas del clima y las especies).

- v) Los evaluadores deben incluir medidas de confianza para cada calificación de rasgo (p.ej., Bagne et al., 2011; Thomas et al., 2011; Gardali et al., 2012).

#### 5.1.5.4 Calculando medidas generales de vulnerabilidad

Antes de combinar las calificaciones de rasgos en medidas generales de la vulnerabilidad al cambio climático, muchos autores las han ponderado por la importancia del rasgo, determinada ya sea a través de la opinión de expertos (p.ej., Graham et al., 2011; Gardali et al., 2012; Young et al., 2012) o a través de la fiabilidad de la precisión de la calificación (p.ej., Thomas et al., 2011). Luego, normalmente se combinan las calificaciones resultantes en una de dos maneras. Se puede obtener la calificación final de manera **computarizada** (p.ej., a través de reglas de adición (Bagne et al., 2011; Graham et al., 2011) o multiplicación (Gardali et al., 2012); consulte la información que se presenta a continuación) en cuyo caso, el resultado general de la EVCC sería calificaciones y, con frecuencia, como resultado de estas calificaciones, encajaría en categorías (p.ej., Young et al., 2012) o rangos generales de vulnerabilidad. También se pueden obtener calificaciones generales a **través de un marco lógico basado en reglas** que normalmente asigna las especies a categorías generales de vulnerabilidad (p.ej., Chin et al., 2010; Bagne et al., 2011; Foden et al., 2013). Alentamos a los usuarios a realizar análisis de sensibilidad para identificar la imprecisión potencial de sus sistemas de calificación seleccionados.

Los **sistemas combinados de calificación** han recibido muy poca atención en la literatura sobre las EVCC a pesar de que,

**Tabla 10. Ejemplos de los rasgos considerados en cinco EVCC basadas en rasgos** (adaptado de Willis et al., 2015).

	(Foden et al., 2013)	(Garnett et al., 2013)	(Gardali et al., 2012)	(Thomas et al., 2011)	(Graham et al., 2011)
Especialización de hábitat	X	x	X		x
Especialización dietética		x			x
Tolerancia ambiental/climática	X	x	x		
Interacciones interespecíficas afectadas	X			X	
Sensible a desencadenantes ambientales	X				
Rareza	X	X		X	
Dispersión	X		X		
Capacidad de evolución	X				
Exposición	X	X	X	X	
Capacidad reproductiva/de selección	X	X			X
Estado migratorio			X		
Otras amenazas				X	
Tamaño del cuerpo					X
Tamaño del cerebro		X			

como todos los sistemas de calificación, afectan directamente el resultado final de una evaluación (Willis et al., 2015). En general, existen dos “niveles” de reglas de calificación: uno que se utiliza para combinar las calificaciones de un módulo (reflejando, por ejemplo, la exposición, sensibilidad o capacidad de adaptación) y otro, para combinarlas a través de varios módulos (combinando la exposición, sensibilidad o capacidad de adaptación). Las reglas de combinación reflejan cómo los rasgos interactúan a fin de expresar una vulnerabilidad general. Si bien existen muchas maneras de combinar las calificaciones de manera computarizada, a continuación revisamos dos reglas relativamente comunes y simples basadas en la adición y la multiplicación.

Las **reglas de adición** (calificación #1 + calificación #2 + calificación #3 + ...) reflejan situaciones en las que los rasgos no interactúan y pueden reemplazarse entre sí para aumentar la vulnerabilidad o contrarrestarse para reducirla. Por ejemplo, se puede reflejar la sensibilidad de una especie de planta a través de calificaciones de dos rasgos: una que refleje los efectos letales de las altas temperaturas sobre el polen y otra, que refleje la necesidad de bajas temperaturas de invierno para que la estratificación de semillas se active en la primavera. La regla de la adición asume que los rasgos se pueden sustituir entre sí para atribuir la misma cantidad de sensibilidad al cambio climático (p.ej., las especies podrían tener la misma sensibilidad sin importar si son sensibles a las altas temperaturas o carecen de bajas temperaturas). Matemáticamente, las reglas de adición mantienen simetría en las calificaciones neutrales (p.ej., en una escala de 7 puntos de -2 a 2, siendo 0 la calificación neutral, sumar dos puntos resulta en una nueva escala de -4 a 4 y el 0 permanece como la calificación neutral). En este contexto, una “media” determina que los promedios entre las calificaciones tengan las mismas propiedades, aunque también tiende a disminuir la influencia de las calificaciones extremas, lo que reflejaría la hipótesis de que los rasgos perjudiciales podrían compensar el efecto favorable de las combinaciones de otras (y viceversa).

Las **reglas de multiplicación** (calificación #1 \* calificación #2 \* calificación #3 \* ...) implícitamente asumen que los rasgos pueden mejorar o exacerbar los estados de las otras. Por ejemplo, empeora la dependencia a un hábitat inusual particular cuando este es invadido por la dispersión de especies no nativas debido al cambio climático. No se pueden utilizar las reglas de multiplicación en todas las situaciones: siguiendo con el ejemplo anterior en el que se califica una especie de planta de acuerdo a la sensibilidad del polen a altas temperaturas y la necesidad de las semillas de bajas temperaturas, la presencia de un umbral bajo de las temperaturas letales para el polen no parecería modificar directamente la necesidad de la especie de bajas temperaturas para la estratificación de las semillas; por lo que no sería apropiado multiplicar las calificaciones de estos dos rasgos.

Las reglas de multiplicación son apropiadas en tres casos: (i) cuando los aspectos calificados representan probabilidades independientes, en cuyo caso el producto refleja la probabilidad de incidencia de todos los aspectos (p.ej., la probabilidad de temperaturas muy altas y muy bajas); (ii) cuando una probabilidad multiplica un resultado, en cuyo caso el producto refleja la utilidad esperada (Arponen, 2012); p.ej., uno menos la probabilidad de temperaturas altas multiplicado por el conjunto de semillas refleja la cantidad promedio esperada de semillas) y (iii) cuando ocurre la situación (i) o la (ii) pero los valores reflejan los índices de probabilidades o resultados (Arponen, 2012), en cuyo caso se obtiene un índice de probabilidades o utilidad esperada. A diferencia de las reglas de adición, las reglas de multiplicación no mantienen simetría en una calificación “neutral”. Asimismo, si cero y/o valores negativos son parte de un sistema de calificación, las reglas de multiplicación podrían tener efectos imprevistos (p.ej., multiplicar por 0 reduce la influencia de todas las otras características a 0 y multiplicar una calificación negativa que refleja un daño por una positiva que refleja un beneficio produce una calificación negativa que refleja un daño general; mientras que multiplicar un número par de calificaciones negativas produce una calificación positiva). Por consiguiente, sugerimos tener cuidado al utilizar la regla de multiplicación.

En este taller sobre la conservación de la biodiversidad, que se realizó al norte de Queensland, hubo discusiones facilitadas en pequeños grupos sobre los desafíos, oportunidades y estrategias para la conservación de la biodiversidad en las regiones tropicales húmedas a la luz de la última información de la ciencia climática. Participaron investigadores, expertos técnicos locales y miembros experimentados de grupos comunitarios de conservación.  
© Terrain NRM





**Otros sistemas de calificación** (especialmente los sistemas basados en reglas) pueden reflejar interacciones más sutiles entre los rasgos. Por ejemplo, se puede utilizar una regla de “superación” cuando el estado de un rasgo particular anula la relevancia de otras (p.ej., la inundación de un hábitat por la elevación del nivel del mar anula la relevancia de mucha diversidad genética restante). Las reglas de “máximo” y “mínimo”, las cuales consideran los valores máximos y mínimos de los rasgos, son la versión extrema de la regla de superación porque asumen que cualquier rasgo puede anular el efecto de todos los otros. En algunos casos, diferentes eventualidades pueden superarse entre sí (p.ej., una polinización fallida impide la dispersión de propágulos y la falta de animales que sirvan como vectores de dispersión obvia la presencia de hábitats cercanos disponibles). En estos casos, se puede necesitar una serie jerárquica de reglas de superación para reflejar las eventualidades ecológicas (p.ej., Smith et al., 2016). Un término medio entre la regla de “superación” y las aritméticas es ponderar las calificaciones para reflejar las diferentes magnitudes de importancia para la vulnerabilidad climática. Por ejemplo, el Índice Estandarizado de Vulnerabilidad y Evaluación de Valor (SIVVA, por sus siglas en inglés) permite a los usuarios ponderar cada criterio por su importancia esperada antes de combinar las calificaciones (Reece & Noss, 2014). Se pueden aplicar las reglas de adición, multiplicación u otras antes de ponderar.

Alentamos a los usuarios a considerar cuidadosamente los efectos de sus reglas combinadas al diseñar su EVCC y a justificar el sistema particular de reglas que utilizan.

#### 5.1.5.5 Falta de datos, incertidumbre, variabilidad e inaplicabilidad

Casi todas las evaluaciones basadas en rasgos tendrán problemas de falta de datos, incertidumbre sobre los estados y la calificación y variación de los rasgos de las especies. En este contexto, la “falta de datos” se refiere a las situaciones en las que se podría evaluar un rasgo si se conociera su estado; la “incertidumbre” se refiere a la falta de fiabilidad de la evaluación de un estado de un

rasgo (p.ej., si se debe asignar a un rasgo un valor de 1, 2 o 3) y la “variabilidad” se refiere a la variación intraespecífica de una especie de un rasgo relacionada a la vulnerabilidad climática. A pesar de que se relacionan conceptualmente, cada una de estas situaciones requieren el manejo de procedimientos importantes. La falta de datos puede ser imputada (p.ej., Schrodtt et al., 2015) o reemplazada con la investigación focalizada. Sin embargo, habrá situaciones en las que no se podrán asignar los estados de los rasgos. En este caso, una opción es asignarle una calificación particular a los valores faltantes (p.ej., una calificación de “no efecto”; Young et al., 2015). Sin embargo, esto asume implícitamente una hipótesis sobre la estrategia que utilizan los usuarios de la EVCC para manejar la incertidumbre. Por ejemplo, asignarle una calificación de “no efecto” a los casos faltantes tiende a reducir la dimensión de las calificaciones finales de las especies poco conocidas (Anacker et al., 2013). Esto, a su vez, puede tener efectos profundos en la evaluación general de la vulnerabilidad de las especies (p.ej., Platts et al., 2014). Otro enfoque es calcular la vulnerabilidad general varias veces asumiendo las diferentes calificaciones de los datos faltantes en cada oportunidad (p.ej., reflejando los beneficios, no efectos o daños del cambio climático; Smith et al., 2016) e informar los resultados como un intervalo. Una tercera opción es estandarizar las calificaciones dentro de un módulo, por ejemplo, dividiendo entre la calificación máxima para cada especie; Reece & Noss, 2014). De esta manera, los datos faltantes no afectan el resultado final.

Los datos faltantes son solo un aspecto que contribuye a la incertidumbre; otras causas de incertidumbre incluyen la falta de confianza en el estado de un rasgo (versus la completa falta de conocimiento), dificultad para determinar los umbrales (es decir, asignar la calificación apropiada a un estado de rasgo) y contradicciones en los cálculos de los estados de rasgos, entre otras. Una vez más, se han utilizado varios enfoques para abordar la incertidumbre, incluyendo evaluaciones independientes realizadas por varios expertos (es decir, un sistema tipo Delphi; Runge et al., 2011) o la asignación de un intervalo de calificaciones. Luego, se puede analizar una EVCC varias veces utilizando, por ejemplo,

Izquierda: Conservacionistas y planificadores del uso de la tierra sostuvieron un taller para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático de la biodiversidad al oeste de Tanzania. © Wendy Foden. Derecha: Las preocupaciones incluyen a los hipopótamos del Parque Nacional Katavi, que comienzan a congregarse en las últimas piscinas restantes en junio. Al final de la temporada de sequía (octubre), varios miles se encuentran confinados allí, causando estrés y mortalidad. Los ríos que suministran agua al parque varían considerablemente su flujo entre las estaciones, pero su embotellamiento se ha visto exacerbado por aumentos recientes de los cultivos río arriba del parque, como también por el aumento de las temperaturas y la mayor irregularidad de las precipitaciones. © Miho Saito



valores “optimistas” o “pesimistas” de las calificaciones (p.ej., Foden et al., 2013) o utilizando la aleatorización de Monte Carlo (Reece & Noss, 2014). Otra alternativa es diseñar un módulo de “disponibilidad de información” separado que refleje la integridad del conocimiento sobre cada especie (Benscoter et al., 2013). En cualquier caso, en la mayoría de los casos se debe reflejar la incertidumbre en la evaluación de la vulnerabilidad como un aspecto separado (p.ej., como una calificación aparte - p.ej., Moyle et al., 2013); como barras de error (p.ej., Benscoter et al., 2013) o como diferentes “escenarios” optimistas o pesimistas (p.ej., Foden et al., 2013; Smith et al., 2016). Algunas evaluaciones basadas en rasgos ponderan las calificaciones finales de incertidumbre, por ejemplo, asumiendo que las especies con mayor incertidumbre en sus calificaciones son inherentemente de menor prioridad (p.ej., Thomas et al., 2011; Shoo et al., 2013), lo que en este caso es directamente contradictorio con el principio de precaución; por lo que recomendamos informar la incertidumbre aparte de la vulnerabilidad “promedio” (esperada).

La variabilidad de los rasgos de las especies es similar, aunque también considerablemente diferente, a la incertidumbre de los rasgos (cf. Lehmann & Rillig, 2014a). La variación intraespecífica es probablemente la regla en vez de la excepción y sin embargo los enfoques basados en rasgos (y otros) con frecuencia asumen que las especies actúan como unidades homogéneas ante el cambio climático. De hecho, la variación intraspecífica puede conferir mayor vulnerabilidad a la variación climática si refleja adaptación local (p.ej., Valladares et al., 2014) o menos vulnerabilidad si refleja habilidad de adaptación genética o plasticidad fenotípica (Avolio & Smith, 2013). En cualquier caso, asignar una sola calificación a un rasgo que varía intraespecíficamente ignora este aspecto importante de la vulnerabilidad. En este caso, la práctica más apropiada sería asignar un intervalo de valores y calcular la vulnerabilidad general varias veces para reflejar la variación intraespecífica en los rasgos. Alternativamente, la “variación en rasgo” se puede tratar como un rasgo en sí para indicar vulnerabilidad aumentada/reducida como resultado de la variación en el rasgo en cuestión.

El aumento de la temperatura de la arena de playa está afectando a las tortugas cardón (*Dermochelys coriacea*), una especie que ya se encuentra en peligro crítico de extinción. A temperaturas más altas, sus huevos enterrados incuban desproporcionadamente una mayor proporción de tortugas hembras lo que causa poblaciones con proporciones de sexo claramente sesgadas. Sus nidos y hábitats de anidación también se ven amenazados por el aumento de los niveles del mar y de las tormentas. Izquierda: © Roderic Mast / Oceanic Society. Derecha: © Brian Hutchinson



Del mismo modo, algunos rasgos pueden no ser aplicables para algunas especies pero sí para otras; una situación que normalmente surge cuando se evalúan grandes grupos de especies taxonómicamente diferentes (p.ej., Foden et al., 2013). Por ejemplo, la tasa de descarga de un río es muy relevante para los peces lóticos pero no para la mayoría de las aves. Una opción es diseñar EVCC individuales para cada grupo de especies (p.ej., Foden et al., 2013 corales, aves y anfibios evaluados separadamente), pero en algunas situaciones es conveniente comparar la vulnerabilidad de grupos de especies diferentes (p.ej., en la misma unidad de manejo). En este contexto, se pueden utilizar algunos de los métodos para lidiar con la falta de datos (especialmente la estandarización). Cuando existe poca superposición entre los rasgos de las especies para su calificación, entonces se puede utilizar la evaluación de diferentes grupos de especies para abordar la situación en la que son calificados efectivamente de manera separada. En este caso, la inclusión de una calificación neutral en el sistema puede servir como punto de referencia para comparar los diferentes grupos de especies ya que es una medida común de “no daño” aun cuando sea ambigua la comparación de calificaciones diferentes a cero en grupos diferentes.

### 5.1.6 Considerando la disponibilidad de hábitat

Cualquier factor no climático, que limita el espacio climático de una especie, puede influenciar nuestra capacidad para evaluar los efectos del cambio climático. Por supuesto, la vulnerabilidad de las especies al cambio climático será influenciada por la disponibilidad de un hábitat adecuado, tanto en el presente como en el futuro. En particular, puede que una especie no ocupe partes de su área de distribución presente potencial determinado climáticamente porque se han destruido todos los hábitats adecuados en algunas áreas; por lo que probablemente los modelos ajustados al área de distribución reconocida o realizada (el cual es más pequeño que el área de distribución potencial) no proyecten por completo la ocupación del área climáticamente adecuada del

presente ni del futuro. Contrariamente, grandes partes del área de distribución climáticamente determinado potencial futuro de una especie puede carecer de un hábitat adecuado y si no se toma esto en cuenta, se puede subestimar la vulnerabilidad de la especie al cambio climático. En circunstancias limitadas, los métodos estadísticos pueden ayudar a describir las relaciones entre la incidencia de la especie y el clima, representando este sesgo espacial (Beale 2014). Un enfoque alternativo es intentar elaborar directamente un modelo climático de los impactos de tales variables no climáticas. Aunque el clima es considerado ampliamente como el principal determinante de incidencia a grandes escalas (Thuiller et al., 2004; Huntley et al., 2007), a escalas más pequeñas, se puede mejorar el desempeño del modelo climático al incluir variables no climáticas adicionales como la cobertura de la tierra o información sobre las interacciones de las especies (p.ej., Araújo & Luoto, 2007; Luoto et al., 2007). La inclusión de variables no climáticas puede ser aún más importante al realizar modelos climáticos de la abundancia de las especies (p.ej., Renwick et al., 2012). Sin embargo, aunque los modelos de la abundancia de las especies en sitios individuales pueden tener poco valor explicativo a nivel del sitio, sus predicciones pueden dar cuenta de los cambios poblacionales a gran escala cuando se resumen en escalas espaciales más grandes (Johnston et al., 2013).

Pese a que puede ser conveniente incorporar medidas de variables no climáticas en los modelos de adecuación climática, particularmente al considerar resoluciones espaciales pequeñas o en la elaboración de modelos climáticos de abundancia, se enfrentan dos problemas serios al intentar construir y utilizar modelos que incorporen la disponibilidad o pertinencia de los hábitats junto con la adecuación climática. Primero, si se combinan las variables de hábitat (p.ej., tipos de cobertura de la tierra, variables topográficas) con las variables climáticas en un solo modelo, las correlaciones entre ellas influenciará la forma precisa de las relaciones con las variables climáticas. A pesar de que se podría argumentar que estos modelos pueden describir mejor la relación con el clima porque representan otros motores potenciales de la incidencia de las especies que también pueden estar (de modo espurio) correlacionados con el clima, es igualmente factible que al menos una de estas correlaciones colapse por el cambio climático (p.ej., la estructura vegetal en una localidad puede cambiar a medida que cambia el clima). Como consecuencia, las proyecciones de las condiciones climáticas futuras realizadas con tales modelos pueden ser imprecisas. Desde luego, si parte de la distribución de un tipo particular de cobertura de la tierra u otra variable no-climática particular se encuentra relacionada con el clima, al menos parcialmente, se podría alegar que asignar parte de esa variación a la cobertura de la tierra, en vez del clima, podría proporcionar una evaluación conservadora de los impactos probables del cambio climático en una especie.

Segundo, las proyecciones futuras de la cobertura de la tierra son mucho más problemáticas que las del cambio climático. No obstante, la preparación de las Trayectorias de Concentración Representativas desarrolladas para el Quinto Informe de Evaluación del IPCC incluyó la producción consistente de datos de cuadrícula de medio grado sobre el uso de la tierra en el presente

y en el futuro proyectado (Hurtt et al., 2011). En principio, estos datos se encuentran ahora disponibles para elaborar EVCC más realistas que incorporen los cambios futuros en los usos de la tierra y cómo estos afectarán la habilidad de las especies de ocupar sus áreas de distribución futuras potenciales determinados climáticamente. Sin embargo, hasta la fecha desconocemos la existencia de estudios de este tipo, aunque tal como demostraron Hannah et al., (2013), el potencial de que los cambios futuros en el uso agrícola de la tierra como respuesta al cambio climático causen conflictos mayores con la conservación de la biodiversidad es considerable. Alternativamente, se pueden realizar las proyecciones a través de modelos que también incorporen la cobertura del suelo, pero sin incluir ningún elemento de cambio proyectado en ella o en cualquier otra variable no climática (p.ej., Renwick et al., 2012). En este caso, aunque es posible que estas proyecciones no sucedan, dado que es posible que ocurran algunos cambios en la cobertura de la tierra por la influencia directa de los humanos, tales proyecciones pueden ser vistas como indicadoras de cómo probablemente cambie la aptitud de la actual cobertura del suelo para una especie debido al cambio climático (Pearce-Higgins & Green, 2014). Tales modelos pueden ser también utilizados para abordar otras cuestiones como considerar una cobertura óptima del suelo para reducir los impactos negativos del cambio climático o para explorar las interacciones potenciales entre el clima y distintos escenarios de cambio en cobertura del suelo (p.ej., Vos et al., 2008; Barbet-Massin et al., 2012).

En el presente, es probable que los problemas que enfrentan las especies a medida que intentan ajustarse al cambio climático, y que tienen que ver con la impermeabilidad de muchos terrenos para la dispersión debido al cambio del uso de la tierra, serán más importantes en las próximas décadas que los problemas a más largo plazo que surjan de los cambios del uso de la tierra debido a cambios climáticos y económicos. La simple observación de que los cambios climáticos parecen estar superando la capacidad de respuesta de las especies y los ecosistemas (Devictor et al., 2008) es un problema aún más apremiante, aunque probablemente se exacerbe por la extensión de la pérdida de hábitat y fragmentación como resultado del uso que le dan los humanos a la tierra en muchas regiones del mundo. La inclusión en las EVCC de tasas realistas de dispersión de las especies a nuevas áreas climáticas adecuadas es al menos tan urgente e importante como los esfuerzos de incorporar los cambios potenciales en el uso de la tierra.

## 5.2 Desafíos para aplicar los enfoques actuales de EVCC

### 5.2.1 Impactos directos versus indirectos del cambio climático

El enfoque principal de muchos estudios de EVCC es evaluar los impactos directos de los cambios climáticos en especies focales. Sin embargo, hasta la fecha, se le ha dado mucha menos atención a los impactos indirectos de las respuestas humanas y ecosistémicas al cambio climático, incluyendo las amenazas y los elementos estresantes nuevos y de interacción que ellos introducen sobre las especies. Describimos estos efectos como ‘impactos indirectos’ al cambio climático y distinguimos dos tipos en este documento.



Los impactos indirectos de los **humanos** resultan de los esfuerzos tanto de mitigación, como de adaptación al cambio climático (Paterson et al., 2008; Turner et al., 2010; Maxwell et al., 2015). Las respuestas humanas de mitigación son normalmente acciones proactivas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero e incluyen esquemas de deforestación y degradación forestal (REDD+, por sus siglas en inglés), restauración de los bosques y aumento de energías renovables (p.ej., los biocombustibles). Las respuestas de adaptación pueden ser proactivas, incluyendo acciones como la construcción de defensas marinas para proteger las áreas costera de un incremento en los niveles del mar y el aumento de tormentas, la construcción de infraestructuras hidroeléctricas, de viento y solares para la generación de energía de bajas emisiones y el aumento de la extracción de agua para la irrigación de cultivos e incrementar los suministros de agua potable. Algunas respuestas pueden ser solamente reactivas, o reactivas y proactivas al mismo tiempo. Estas últimas incluyen la migración de humanos, los cambios en el uso de la tierra, el aumento en la dependencia de especies salvajes (p.ej., Hazzah et al., 2013) y los conflictos entre los humanos con la flora y fauna silvestre por los recursos de agua (Ogutu et al., 2009).

También pueden surgir impactos indirectos de alteraciones, causadas por el cambio climático, en los **sistemas naturales**, incluyendo las interacciones entre las especies (p.ej., en relaciones mutualistas, huésped-parásito, depredador-presa o de competencia) y en hábitats y ecosistemas (p.ej., disminución de la calidad y adecuación del hábitat; cambios en el tipo de ecosistema tales como el incremento en la invasión de plantas leñosas en las sabanas y pastizales, asociado al incremento en el CO<sub>2</sub> (Midgley & Bond, 2015)). Sin embargo, no se deben confundir estos impactos indirectos con los mecanismos indirectos que median muchos de los impactos directos del cambio climático en las especies (Ockendon et al., 2014). Tal como ha sido ampliamente reportado a través del registro palaeoecológico (Blois et al., 2013), las condiciones climáticas con frecuencia modulan el resultado de las interacciones competitivas (p.ej., Woodward, 1975; Woodward & Pigott, 1975) y otras interacciones bióticas (p.ej., Spiller & Schoener, 2008).

La función de estos impactos indirectos en la exacerbación de las amenazas y elementos estresantes de la biodiversidad es con frecuencia ignorada. La tasa mundial de extinción de especies excede actualmente la tasa de originación por al menos un orden de magnitud (Woodruff, 2001; Barnosky et al., 2011) y probablemente por ~1000 veces (Pimm et al., 2014). Un estimado de 26%, 14% y 41% de los mamíferos, aves y anfibios, respectivamente, se encuentran incluidos como amenazados en la Lista Roja de UICN (UICN, 2015), principalmente por amenazas que no se relacionan históricamente al cambio climático. Por ejemplo, se encontró que en el grupo de los mamíferos, al menos 40% de las especies están afectadas por la pérdida y degradación de hábitat y 17% de ellas están afectadas por la caza o la cosecha (Schipper et al., 2008); otros elementos de estrés que representan fuente de peligro para las especies incluyen la sobre-explotación, las especies invasoras, la propagación de enfermedades y los cambios en los regímenes de incendios. La importancia relativa de diferentes elementos de estrés varía geográficamente y a través

de los distintos grupos taxonómicos (Ceballos & Ehrlich, 2002; Ehrlich & Pringle, 2008), así como, sus efectos en incrementar potencialmente los impactos del cambio climático.

Una prioridad claramente importante para las EVCC es incluir los impactos indirectos del cambio climático sobre las especies. Los enfoques mecanicistas y basados en rasgos normalmente consideran los cambios en las interacciones entre las especies, mientras que los supuestos sobre los cambios de la calidad de los hábitats están implícitos en la mayoría de los enfoques. Recien están comenzando a surgir estudios que evalúan los impactos indirectos generados por los humanos y Maxwell et al. (2015) discuten los enfoques para integrarlos en las EVCC basados en especies y en lugares. Segan et al. (2015) combinaron un enfoque correlativo de EVCC con datos sobre el impacto proyectado del cambio climático sobre las poblaciones humanas de Sudáfrica (tal como evaluaron Midgley et al., 2011), y encontraron que un quinto de las especies amenazadas de aves y un décimo de Áreas Importantes para las Aves que se consideraban con relativa baja vulnerabilidad al cambio climático cambiaron a ser altamente vulnerables al considerar los impactos indirectos probables del cambio climático. Algunos enfoques basados en rasgos (p.ej., Young et al., 2012) permiten la consideración de los impactos humanos en las especies y algunos enfoques combinados (p.ej., Thomas et al., 2011) incluyen la evaluación de la severidad de amenazas no climáticas. Sin embargo, actualmente son escasos los datos sobre los impactos indirectos, potenciales y realizados, del cambio climático.

Todos los enfoques, basados en rasgos, mecanicistas y combinados tienen buen potencial para incluir los impactos indirectos del cambio climático, pero en el presente, los métodos prácticos para incluirlos en las EVCC están generalmente desarrollados de manera deficiente. El desarrollo de métodos y la recolección de conjuntos de datos que describan los impactos directos son actualmente una prioridad importante para el desarrollo de EVCC. Actualmente, recomendamos que los usuarios identifiquen el potencial que estos efectos indirectos tienen de afectar en gran medida la vulnerabilidad al cambio climático y a tomar esto en cuenta al momento de realizar e interpretar las evaluaciones de EVCC.

## 5.2.2 Interpretando los resultados de los modelos espacialmente explícitos

### 5.2.2.1 Infiriendo cambios de área de distribución por medio de proyecciones de modelos

El resultado de la mayoría de los enfoques correlativos mide la 'aptitud' de las cuadrículas o la 'probabilidad de presencia' de una especie en una cuadrícula. A fin de transformar estos resultados en proyecciones cualitativas de la presencia o ausencia potencial futura de las especies y por ende, obtener cálculos de los cambios potenciales del área de distribución de las especies, es necesario aplicar algunos valores de los umbrales de adecuación o probabilidad de incidencia por encima de los cuales las especies se considerarían como presentes o por debajo de los cuales se considerarían ausentes. Hasta algunas de las primeras aplicaciones de los modelos correlativos identificaron la necesidad de optimizar





A pesar de que el árbol áloe-aljaba (*Aloe dichotoma*) de Suráfrica está adaptado a su ambiente del desierto de Namib, está experimentado un cambio de intervalo de distribución hacia el polo sur, probablemente debido al aumento de las temperaturas y de la severidad de las sequías. Aunque las poblaciones del norte están disminuyendo hacia la extinción, la expansión del intervalo hacia el sur es limitado lo que causa una contracción en el intervalo de distribución de la especie. Abajo a la derecha: Wendy Foden mide un árbol áloe-aljaba para determinar su estructura de edad y la extensión de mortalidad en su población local. © Wendy Foden

estos valores de umbrales (consulte p.ej., Huntley et al., 1995) en vez de utilizar un valor arbitrario (p.ej., 0,5 como es convencional en la regresión logística). El enfoque más utilizado es seleccionar el valor de umbral que optimice alguna medida de bondad de ajuste del modelo correlativo, presentando el problema de que se han propuesto y utilizado muchas de esas medidas. Liu et al., (2005, 2013) ha explorado el desempeño de medidas alternativas para determinar los valores de umbrales, tanto para modelos ajustados para datos de presencia y ausencia (Liu et al., 2005), como para modelos ajustados para solo datos de presencia (Liu et al., 2013). En ambos casos concluyen que el valor de umbral que maximiza la suma de sensibilidad y especificidad es el único umbral, entre los analizados, que presentará el mismo valor sin importar si es calculado utilizando ausencias reales o lugares seleccionados aleatoriamente (y también asumiendo que se toman muestras de las presencias aleatoriamente del área de distribución de las especies). Esta medida es equivalente a uno más el valor de la Estadística de Desempeño Verdadero (Allouche et al., 2006); maximizando esta última nos proporciona valores de umbral óptimos idénticos que los obtenidos al maximizar la suma de la especificidad y la sensibilidad, tal como proponen Liu et al. (2005, 2013). Por ende, si se deben establecer umbrales utilizando una medida única, recomendamos seleccionar el umbral óptimo como el que optimiza el valor de la Estadística de Desempeño Verdadero. Sin embargo, aunque las reglas de umbrales pueden brindar conclusiones dramáticamente diferentes sobre si las especies disminuirán o aumentarán como consecuencia del cambio climático (Nenzén & Araújo, 2011), recomendamos experimentar cuidadosamente con reglas de umbrales alternativas considerando si es que los resultados optimistas o los pesimistas son más apropiados para el análisis. Además, el establecimiento de umbrales con frecuencia opacará diferencias importantes de aptitud entre los lugares; es decir, no se puede diferenciar un lugar que es moderadamente adecuado y que se encuentra solo un poco por encima del umbral de uno que sea altamente adecuado y se encuentre muy por encima del umbral (Guillera-Aroita et al., 2015). Por consiguiente, una alternativa es mantener los valores proyectados de adecuación naturales (sin umbrales) para evaluar si las condiciones ambientales para la especie mejorarán o se degradarán (p.ej., Still et al., 2015). Por otro lado, estas evaluaciones de cambio en la aptitud general son un complemento útil, más que una alternativa, al uso de los umbrales para la evaluación de cambios potenciales en la extensión o grado de superposición de área de distribución.

#### **5.2.2.2 Infiriendo cambios poblacionales a través de cambios de área de distribución**

Es improbable que los cambios poblacionales se relacionen linealmente con los cambios en la extensión de distribución porque rara vez los individuos se dispersarán uniformemente en el área general de distribución de una especie. Sin embargo, a falta de información más específica, esta hipótesis es admisible (IUCN SSC Standards and Petitions Subcommittee, 2016), aunque se debe establecer explícitamente. Loucks et al., (2010), por ejemplo, utilizaron esta hipótesis al proyectar los impactos del aumento futuro del nivel del mar en la población de *Panthera tigris* (tigre) en los manglares de Sundarbans. No obstante, si se tiene que utilizar tal hipótesis, un paso fundamental es considerar

primero si las porciones de hábitat son lo suficientemente grandes como para soportar subpoblaciones viables, considerando el efecto de la estocasticidad demográfica y los efectos de Allee; y segundo, si los parches proyectados como disponibles en el futuro serán posiblemente colonizadas por individuos apartir de los parches actualmente ocupados (IUCN SSC Standards and Petitions Subcommittee, 2016). Estas consideraciones serán específicas para las especies, por lo que se deben realizar de manera separada para cada taxón al que se le realizará una EVCC.

Un enfoque alternativo, cuando existen datos de la abundancia de la especie o que registren un indicador apropiado de abundancia, es elaborar un modelo climático de la relación entre la abundancia, en lugar donde ocurre, y variables bioclimáticas adecuadas. Estos modelos se pueden utilizar entonces para proyectar el patrón de abundancia potencial futuro y para evaluar el cambio general probable en el tamaño de la población (consulte p.ej., Huntley et al., 2012; Renwick et al., 2012; Johnston et al., 2013). Los resultados presentados por Huntley et al., (2012) proyectaron que las poblaciones de aves en el área examinada (Sudáfrica) disminuirían en promedio ~50%, mientras que la extensión del área de distribución en promedio disminuiría en tan solo ~30%. Al integrarlos, los cambios predichos en la abundancia de las poblaciones de aves marinas y acuáticas invernantes en áreas protegidas como consecuencia del cambio climático, estuvieron significativamente correlacionados con los cambios observados en las poblaciones a nivel nacional (Johnston et al., 2013), respaldando la validez de este enfoque. Siempre que sea posible, elaborar modelos climáticos de la abundancia, en vez de la incidencia, proporciona medidas que pueden aplicarse más fácilmente para calificar los umbrales para la designación de sitios, para asignar a listas rojas (p.ej., Johnston et al., 2013) o para modelar el riesgo de extinción. Aun en lugares donde no hay datos de abundancia disponibles, la mayoría de los modelos correlativos proporcionan una medida de 'aptitud' o 'probabilidad de presencia' de una especie en cada cuadrícula. Al comparar estos valores para un futuro escenario climático proyectado con los simulados para el clima 'presente' se puede obtener evidencia de cualquier cambio potencial en la población de la especie en o por encima del implicado como consecuencia de cualquier cambio en la extensión del área de distribución total. Por ejemplo, un descenso en la aptitud media indicaría la probabilidad de que la población de la especie se redujera más de lo sugerido por la disminución de la extensión del área de distribución.

También se han desarrollado enfoques alternativos para evaluar los riesgos de extinción basados en los resultados de los modelos correlativos (consulte p.ej., Thomas et al., 2004), pero éstos no son especies específicos, sino que proporcionan cálculos generales de la proporción de estas en riesgo elevado de extinción.



# 6. Comprendiendo y trabajando con la incertidumbre

Brian Huntley, Wendy B. Foden, James Pearce-Higgins y Adam Smith

Los resultados de todas las EVCC estarán sujetos a incertidumbre debido a las incertidumbres asociadas a todos los datos y métodos utilizados para realizar las evaluaciones. Algunas fuentes de incertidumbre son obvias (p.ej., incertidumbre sobre los escenarios climáticos futuros debido a las trayectorias de emisiones alternativas que se pueden seguir), mientras que otras muchas veces no son ni siquiera identificadas y rara vez cuantificadas sistemáticamente (p.ej., incertidumbre en los datos climáticos históricos de referencia). Generalmente, los métodos utilizados para realizar EVCC no toman en cuenta la mayoría de estas fuentes de incertidumbre. Entonces, ¿cómo deben manejar los desarrolladores y usuarios de las EVCC esta incertidumbre? A continuación describimos algunas de sus fuentes principales y proporcionamos recomendaciones para incorporar e interpretar la incertidumbre en las EVCC.

A medida que aumentan las temperaturas del clima en Queensland, Australia, el pergolero dorado (*Prionodura newtoniana*) se traslada ladera arriba a elevaciones más altas y frías. Se espera un aumento de temperatura de 3 °C el cual reducirá el rango de las aves de 1564 km<sup>2</sup> a solo 37 km<sup>2</sup> y las limitará a solo dos cimas. Con un aumento de 4 °C, desaparecerá su hábitat por completo. © Con Foley



## 6.1 Incertidumbre de los datos de distribución y abundancia de las especies

Existen dos categorías amplias para las incertidumbres de los datos de distribución de las especies: las **presencias falsas** y las ausencias falsas. Las presencias falsas (errores de comisión) son relativamente inusuales en los datos de localidades puntuales o cuadrículas en los que pueden surgir principalmente debido a la identificación errónea de especies, un estado taxonómico incierto, el registro incorrecto de la localidad o debido a un error al introducir datos. Por otra parte, en los casos en los que solo se dispone de polígonos de área de distribución, cualquier transformación de estos para proporcionar datos de cuadrícula para la elaboración de modelos climáticos podría generar diferentes proporciones de presencias falsas dependiendo de la continuidad de distribución de la especie en su área de distribución general y el grado en que el área de distribución utilizado ha considerado información general asociada, por ejemplo, la topografía regional y los límites altitudinales superiores y/o inferiores registrados para la especie.

Las **ausencias falsas** (errores de omisión) surgen principalmente en los datos de cuadrícula en los que los encargados de recolectar los datos de distribución hayan visitado la cuadrícula con mucha menos frecuencia y/o la hayan evaluado con menor intensidad. Puede que algunas cuadrículas no hayan sido nunca visitadas y por lo tanto, no se haya registrado ninguna especie en ella (MacKenzie, 2006). Aun en los casos en los que una cuadrícula haya sido visitada y registrada con relativa intensidad, la variabilidad con la que se detectan las especies resultará en diferentes grados de ausencias falsas. Las especies más crípticas, las cuales tienen la más baja probabilidad de detección, siempre tendrán un mayor número de ausencias falsas que las especies obvias y fácilmente detectables. En muchos casos, también existirán sesgos geográficos sistemáticos en la distribución de falsas ausencias como consecuencia de los esfuerzos de registros sistemáticamente más bajos/altos que se realizan en algunas regiones. Muchas veces, estos sesgos se relacionan con las distancias de las cuadrículas desde centros de poblaciones humanas y/o a las diferencias regionales en la intensidad de las contribuciones de “ciencia ciudadana” a los programas de relevamiento y mapeo de especies.

En muchos casos es difícil establecer un margen o corregir estas imprecisiones, por lo que es importante que aquellos que desarrollan EVCC estén conscientes de estas posibles limitaciones de los datos que utilizan. Aunque algunos conjuntos de datos (p.ej., Atlas Florae Europaeae (Jalas & Suominen, 1972)) no proporcionan ninguna base para identificar las cuadrículas que tienen mayor probabilidad de representar ausencias falsas, otros (p.ej., Atlas del Consejo para el Censo de Aves Europeas

(Hagemeijer & Blair, 1997) indican las cuadrículas en las que los evaluadores buscaron, sin encontrar, las especies y aquellas que no visitaron y en las que no realizaron esfuerzo alguno para encontrar especies particulares. Los mejores conjuntos de datos (p.ej., el Proyecto de Atlas de Aves Sudafricanas) (Harrison et al., 1997) proporcionan datos sobre la cantidad de tarjetas de registro obtenidas en cada cuadrícula lo que permite cuantificar la probabilidad de detección y por ende, la probabilidad de obtener falsas ausencias (consulte p.ej., Bled et al., 2013). En el caso de los conjuntos de datos que no proporcionan esta información adicional, un enfoque para identificar y excluir las ausencias falsas es considerar los registros de otras especies que se encuentran en el mismo grupo taxonómico. Las cuadrículas en las que no se han registrado las especies focales pero que sí existen registros de una o más especies asociadas probablemente representen con más fiabilidad las ausencias reales de las especies focales, mientras que aquellas en las que no se ha registrado ninguna especie del grupo tendrán mayor probabilidad de representar falsas ausencias. Sin embargo, este enfoque presenta algunas limitaciones en el caso de los grupos de especies relacionadas que se encuentran mutuamente ausente en algunas partes del espacio ambiental debido a las limitaciones fisiológicas compartidas que surgen del compartir un ancestro común, en cuyo caso las ausencias mutuas representan l ausencias reales por lo que no deben ser excluidas.

En el caso de los datos de abundancia, o de indicadores de abundancia (p.ej., tasa de registro), aparte de las incertidumbres cualitativas que se asemejan a lo que sucede con los datos de distribución, también se presentan incertidumbres en la cantidad registrada. La magnitud de la incertidumbre dependerá del método utilizado para la recolección de datos, especialmente, la cantidad de tiempo utilizado para registrarlos y/o el número de réplicas realizadas. Además, muchas veces estas incertidumbres no serán espacialmente uniformes, con mayores esfuerzos de registro en las áreas cercanas a centros de poblaciones humanas y líneas de comunicación. No obstante, donde alguna medida de esfuerzo esté disponible, esta puede proveer una indicación de la incertidumbre y puede ser usada para ponderar inversamente los datos puntuales al realizar una EVCC (Stolar & Nielsen, 2015).

## 6.2 Incertidumbre de las proyecciones climáticas y los conjuntos de datos de referencia

Tal como se describió previamente, se puede abordar mejor este componente de incertidumbre realizando EVCC para diferentes escenarios climáticos futuros; que abarque tanto las incertidumbres entre los modelos alternativos para un sistema climático, como las de los escenarios de emisiones futuras, considerándolos de manera independiente y cuyo conjunto nos provee una indicación del intervalo probable de resultados para una especie . Los EVCC usando distintos modelos climáticos, pero para el mismo escenario de emisiones futuros, proveen una indicación del intervalo de incertidumbre entre modelos y usualmente se combinarán en un EVCC promedio para el ensamble el que representa un consenso para el conjunto de modelos usados. Tal como se discutió previamente, a fin de obtener una evaluación realista de las incertidumbres que surgen de trayectorias alternativas



Una rana *Albericus* macho (*Albericus* sp.) cuidando los huevos. El cambio climático está afectando a los anfibios de diferentes maneras, que incluyen el aumento de sus índices metabólicos por el aumento de temperaturas, especialmente en los trópicos. Esto causa que tengan mayores requisitos alimentarios y por ende, dificultades para cumplir las demandas energéticas para su mantenimiento, crecimiento y reproducción. Aún se desconoce cómo estas especies manejarán la presión para disminuir la energía gastada. © David Bickford

de emisiones futuras, es fundamental que se utilicen diferentes escenarios de emisiones que abarquen un intervalo realista de trayectorias futuras de emisiones (p.ej., los escenarios de RCP del IPCC RCP8.5, RCP6, RCP4.5 y RCP2.6). De manera similar, se necesitan proyecciones de al menos tres modelos climáticos si se va a evaluar la incertidumbre que surge de esta fuente, seleccionando modelos que permitan cubrir el intervalo de incertidumbre entre aquellos modelos incluidos por el IPCC (es decir, se deben incluir modelos con temperaturas globales promedio y proyecciones de pluviosidad cercanas al promedio del ensamble y modelos que son relativamente ‘cálidos’/‘fríos’ y ‘húmedos’/‘secos’).

Aunque los conjuntos de datos de las condiciones climáticas de referencia presentan incertidumbres inherentes asociadas a la interpolación de valores, los enfoques de elaboración de modelos climáticos que se utilizan en las EVCC asumen que los datos climáticos cuadriculados no presentan incertidumbres. Además, las bases de datos interpolados generalmente no tienen campos donde se indique la incertidumbre, aun cuando las incertidumbres inherentes a las interpolaciones se encuentran descritas en trabajos publicados (por ejemplo, Hijmans et al., 2005). Los métodos de interpolación utilizados también asumen que los datos registrados en estaciones meteorológicas son conocidos sin incertidumbre, a pesar de que todos los instrumentos de medición son inherentemente imprecisos y que cuando existen observadores humanos involucrados, esto también representa una fuente adicional de incertidumbre. Es impráctico incluir todas estas incertidumbres en una EVCC, pese a su potencial de introducir errores. Comprender sus implicaciones es por lo tanto especialmente importante al interpretar y utilizar los resultados de una EVCC.



### 6.3 Incertidumbre de la selección de variables bioclimáticas

La mayoría de los estudios de EVCC publicados utilizan variables climatológicas simples que, aunque proporcionan modelos significativos desde el punto de vista estadístico, muchas veces no poseen una interpretación mecanicista clara con el desempeño o la supervivencia de la especie focal. En la Sección 5.1.3.4 (Variables bioclimáticas) se discutió cómo seleccionar las variables bioclimáticas adecuadas. En este punto solo queda enfatizar que siempre será mejor realizar una selección informada, basada en el conocimiento biológico de la especie o del grupo taxonómico más amplio al que pertenece, que utilizar simplemente las variables meteorológicas disponibles. En la Sección 5.1.3.4 (Variables bioclimáticas) presentamos una guía sobre las variables predeterminadas apropiadas para diferentes regiones climáticas y especies de las que se carece completamente de conocimiento biológico para realizar la selección.

En los casos en los que la selección informada igual deja un grado de incertidumbre sobre cuáles son las variables bioclimáticas más apropiadas, un enfoque útil es elaborar el modelamiento requerido para la EVCC utilizando dos o más conjuntos factibles alternativos de variables bioclimáticas. Las medidas de bondad de ajuste y solidez de los modelos alternativos pueden indicar entonces que una combinación de variables bioclimáticas es claramente superior, en cuyo caso, se debe basar la EVCC utilizando ese conjunto de variables. No obstante, cuando las combinaciones alternativas de las variables suministran modelos de desempeño similar, entonces será preferible calcular un resultado de consenso entre los modelos ajustados. La mejor manera de realizar tal cálculo de consenso es ponderando los modelos de acuerdo a su desempeño (consultar p.ej., Burnham & Anderson, 2002).

### 6.4 Incertidumbre por evidencia, potencialmente incompleta, de los nichos de las especies

Otra fuente de incertidumbre se relaciona con el grado en que el nicho climático realizado de una especie, bajo las condiciones climáticas presentes, representa su nicho potencialmente realizable. Cuando, como ocurre en la mayoría de las especies, una especie no ocupa por completo su nicho climático potencialmente realizable, probablemente los resultados obtenidos tanto de los enfoques correlativos, como de los mecanicistas serán imprecisos, aunque por razones diferentes.

Los modelos correlativos de nicho ajustados a las áreas de distribución de una especie generalmente subestiman considerablemente el nicho potencialmente realizado y por ende, **sobrestiman la vulnerabilidad** (Varela et al., 2009), ya que probablemente las especies en el futuro podrán extender sus áreas de distribución hacia zonas que ofrecerán combinaciones de condiciones climáticas que no existen en la actualidad pero que estarán disponibles como consecuencia de los cambios climáticos futuros (Williams et al., 2007). Se puede evidenciar la importancia de este asunto en el registro fósil del Pleistoceno, el cual presenta incidencias frecuentes de combinaciones no análogas de especies

asociadas a condiciones climáticas pasadas para las que no existen análogos en la actualidad (Huntley, 1990; Overpeck et al., 1992; Graham et al., 1996; Williams et al., 2001; Jackson & Williams, 2004).

En contraste, el enfoque mecanicista, el cual utiliza evidencia experimental y directa sobre las tolerancias climáticas de las especies, proporciona un estimado del nicho climático fundamental de la especie que casi con certeza representa una sobreestimación de su nicho potencialmente realizado, ya que las interacciones con otras especies juegan un papel fundamental en determinar las áreas de espacio climático que puede ocupar una especie. Por consiguiente, los enfoques mecanicistas tienden a **subestimar la vulnerabilidad** al cambio climático. Lo mismo aplica para los enfoques de modelación de nicho que se basan en la identificación, a partir de las distribuciones actuales de la especie, de los límites bioclimáticos para su incidencia, para luego aplicarlos en forma independiente para generar nichos climáticos hiperrectangulares (p.ej., modelos de envoltorios mínimos rectilíneos como los aplicados por Svenning & Skov, 2004). Estos enfoques ignoran mucha evidencia que indica que las variables climáticas tienen generalmente efectos de interacción al determinar las áreas de distribución de las especies (Huntley, 2001), así como otras evidencias que indican los efectos indirectos de las interacciones bióticas en la limitación de los nichos climáticos realizados de las especies (p.ej., Woodward, 1975). Como resultado, estos métodos generan gruesas sobreestimaciones de los nichos potencialmente realizables de las especies y si se utilizan en una EVCC probablemente **subestimarían** considerablemente **la vulnerabilidad** al cambio climático.

El registro fósil del Pleistoceno es una de las pocas fuentes de información que se puede utilizar para aprender sobre los nichos potencialmente realizables de las especies, pero desafortunadamente éste se encuentra solo disponible para una minoría de especies, principalmente mamíferos (p.ej., *Ovibos moschatus* MacPhee et al. (2005); *Saiga tatarica* Campos et al. (2010) y plantas superiores, especialmente árboles de climas templados de polinización eólica que son regionalmente monotípicos (p.ej., *Fagus sylvatica* y *F. grandifolia* en Europa y Norteamérica, respectivamente) y aún para estas especies, se encuentra incompleto.

### 6.5 Incertidumbre asociada a los rasgos biológicos y datos demográficos

Es útil reconocer que diferentes incertidumbres claves están asociadas a los TVA. Primero, a pesar de que cada vez se estudia más, la importancia de los rasgos de las especies en influenciar su vulnerabilidad al cambio climático se encuentra poco descrita, es incierta y varios estudios muestran diferencias en su relevancia (p.ej., Dobrowski et al., 2011; Angert et al., 2011; Pearson et al., 2014b). Aunque se está desarrollando una base de evidencias sobre la importancia de cuáles rasgos particulares de una especie afectan su vulnerabilidad al cambio climático (p.ej., Pearce-Higgins et al., (2015) sobre aves; Pearson et al., (2014a) sobre anfibios), aún desconocemos cuáles son los más importantes y cómo su relevancia puede variar entre especies y lugares (Pacifi et al., 2015; Willis et al., 2015) (también puede consultar las Secciones 5.1.5.4 (Calculando

medidas generales de vulnerabilidad) y 5.1.5.5 (Falta de datos, incertidumbre, variabilidad e inaplicabilidad) de este informe. Los desafíos para desarrollar una base de evidencias coherente, incluyen dar cuenta de los muchos rasgos y variables que pueden afectar la vulnerabilidad, las interacciones entre ellos y la falta de estandarización de los estudios publicados en los que se basan (Estrada et al., 2016).

Segundo, y relacionado con lo anterior, existe poco consenso sobre cómo se debe calificar o combinar la información sobre los diferentes rasgos para evaluar la vulnerabilidad, lo que dificulta la comparación de resultados de los diferentes enfoques (Willis et al., 2015) y en consecuencia, que no exista una evaluación general de la magnitud real del riesgo proyectado para las especies. Tercero, también existe incertidumbre en la capacidad de los expertos para evaluar los rasgos ecológicos. Dado que el juicio de los expertos puede estar sujeto a sesgos (Burgman et al., 2011), es importante garantizar la aplicación de una metodología clara y válida al utilizarlo.

Dadas las lagunas inevitables en la disponibilidad de datos biológicos y basados en rasgos, aquellos que desarrollan EVCC utilizando métodos basados en rasgos o mecanicistas con frecuencia tendrán que recurrir a utilizar las mejores estimaciones de los valores de los datos faltantes, por ejemplo, utilizando valores de especies relativas cercanas, cuando estén disponibles. Sin embargo, el uso de estas estimaciones inevitablemente introduce un grado adicional de incertidumbre. Aun cuando existen datos disponibles, estos están sujetos a diferentes fuentes de incertidumbre. La mayoría de las características biológicas y demográficas, por ejemplo, muestran diferentes grados de variabilidad intraespecífica, espacial y temporal. Estas incertidumbres en las estimaciones y la variabilidad de las medidas, deben ser consideradas al realizar EVCC con los enfoques mecanicistas o basados en rasgos, idealmente realizando análisis con un intervalo de estimados factibles de cada valor, a fin de abordar la incertidumbre general en los resultados del EVCC.

En muchos casos, los únicos datos disponibles han sido recolectados a partir de experimentos de laboratorio (p.ej., tolerancias fisiológicas) o de individuos ex situ como los que se encuentran en zoológicos, jardines botánicos o programas de reproducción (p.ej., longevidad, edad de primera reproducción, tamaño de la camada). Si se deben utilizar estas fuentes, se deben considerar los sesgos inherentes a estos datos. Por otro lado, las medidas de tolerancias, basadas en trabajos de campo, pueden confundir los efectos de la plasticidad fenotípica, los mecanismos epigenéticos y la genéticos, y también generar estimaciones sesgadas.

Es importante distinguir la incertidumbre (falta de conocimiento) de la variabilidad (variación natural de los rasgos dentro de las especies; cf. (Lehmann & Rillig, 2014b)). La primera se puede rectificar completando los vacíos mencionados anteriormente o que se consideren de otra manera en un sistema de calificación (5.1.5.5 Falta de datos, incertidumbre, variabilidad e inaplicabilidad). En contraposición, no se puede solventar la variación intraespecífica de los rasgos a través de más investigación o completando los vacíos, ya que refleja las diferencias reales entre los individuos y las poblaciones dentro de una especie. En la Sección 5.1.6.5 Falta

de datos, incertidumbre, variabilidad e inaplicabilidad discutimos los métodos para reflejar la variación intraespecífica de los rasgos en las EVCC.

## 6.5.1 Cambios de los rasgos en el tiempo

Los rasgos que se utilizan para predecir la vulnerabilidad al cambio climático (p.ej., tamaño corporal, fecundidad y requisitos energéticos) también pueden estar sujetos a selección por parte de las condiciones climáticas y por ende, pueden cambiar a medida que cambia el clima (Isaac, 2009). Por ejemplo, se predice que el calentamiento y la disminución del oxígeno disuelto causa la reducción de tamaños corporales de peces marinos (Cheung et al., 2012). Según la regla de Bergmann, que propone un patrón global de disminución corporal a lo largo de un gradiente que va de regiones más frías a más cálidas debido a las ventajas de un razón entre área de superficie y volumen mas baja en los climas más fríos (Freckleton et al., 2003; Clauss et al., 2013), se puede esperar una tendencia a la disminución del tamaño corporal a medida que el clima se calienta. Algunos estudios experimentales y observacionales han encontrado evidencia de esto (Sheridan & Bickford, 2011), pero también existen datos contradictorios (Teplitsky & Millien, 2013). La capacidad de las especies para presentar esta respuesta de adaptación puede provenir de la plasticidad fenotípica, la evolución genética a lo largo de generaciones, o ambas, y pueden ser determinantes importantes de su grado de vulnerabilidad al cambio climático. Los cambios fenológicos (es decir, cambios en la temporalidad de eventos tales como la floración y la reproducción), cuyos mecanismo subyacentes puede nuevamente estar asociados a plasticidad fenotípica o la evolución genética, parecen ser una respuesta adaptativa particularmente importante en las plantas y animales, pese a que las especies y hasta grupos taxonómicos más grandes muestran distintas tasas y magnitudes de respuestas a los cambios climáticos del siglo pasado (Root et al., 2003). Tales rasgos de la vulnerabilidad, que muchas veces son subestimados, a pesar de que son difíciles de cuantificar, pueden y deben ser incorporados al aplicar los enfoques mecanicistas y basados en rasgos (Chown et al., 2010).

## 6.6 Incertidumbre asociada a la selección del método

### 6.6.1 Enfoques correlativos

Las incertidumbres que surgen de la elección de la técnica de modelación han recibido considerable atención en la literatura especializada y se ha promovido ampliamente el uso de un enfoque de ensamble que utilice diferentes métodos alternativos y tome un promedio (muchas veces ponderado) de los resultados obtenidos (Thuiller, 2003; Araújo & New, 2007; Marmion et al., 2009). Desafortunadamente, el problema de cómo seleccionar los métodos apropiados y descartar los inadecuados ha recibido mucha menos atención. Sin embargo, tomar la decisión adecuada es fundamental, porque al menos algunos de los métodos utilizados en los estudios publicados hacen supuestos inapropiados; primero, sobre la forma de las relaciones que están siendo modeladas; y segundo, sobre la naturaleza de los efectos interactivos de dos o



Los narvales (*Monodon monoceros*) han sido clasificados por un panel de expertos como una de las especies del Ártico más sensibles al cambio climático debido a su distribución limitada, su dieta especializada y su alta dependencia a los entornos de hielo oceánico. © Magnus Andersen, NPI

más variables bioclimáticas sobre las especies. La inclusión de métodos que hacen tales supuestos inadecuados en un conjunto, probablemente resultad en un consenso menos confiable y con certeza, en uno que es menos robusto que los que se hubiese obtenido de un conjunto más limitado de modelos o quizás, hasta de un solo modelo que no hiciera tales supuestos.

Algunos métodos asumen alguna forma particular para la relación entre la probabilidad de presencia de una especie y cada variable bioclimática; por ejemplo, asumir una relación lineal y otras una relación simétrica Gausiana o 'en forma de campana', cuando en realidad las relaciones en cuestión son generalmente más complejas (Austin, 2007). De manera similar, algunos métodos asumen que no existen interacciones entre las variables bioclimáticas que determinan el área de distribución de una especie (p.ej., modelo de envoltura climática mínima rectilínea aplicado por Svenning & Skov (2004)); y una vez más, existe amplia evidencia de que este no es un supuesto válido. Los métodos más apropiados son, probablemente, los que no hacen supuestos previos sobre las relaciones a modelar y permiten incluir los efectos de interacción de las variables bioclimáticas. Idealmente, se deben ajustar los modelos a lo largo del área de distribución de las especies, permitiendo interacciones no estacionarias entre las variables bioclimáticas y formas complejas de relaciones entre la probabilidad de presencia de las especies y las variables bioclimáticas. Una lista no exhaustiva de los métodos preferidos incluiría: los modelos aditivos generalizados (GAM, por sus siglas en inglés) con selección apropiada de suavizadores (p.ej., splines suavizantes) (Yee & Mitchell, 1991); las superficies de respuesta climáticas ajustadas a través de regresión ponderada localmente (Huntley et al., 1995) y los árboles de clasificación y regresión (De'ath & Fabricius, 2000).

En el contexto de las EVCC, una fuente importante de incertidumbre se relaciona al hecho de que la mayoría de las técnicas de elaboración de modelos climáticos se comportan de manera impredecible cuando, como casi inevitablemente ocurrirá, las predicciones de las áreas de distribución futuras potenciales de la especie requieren extrapolaciones a áreas de espacio climático (es decir, combinaciones de valores de variables bioclimáticas) que según lo proyectado, se encontrarán disponibles en el futuro pero que no se encuentran disponibles actualmente en ninguna parte del dominio de los datos utilizados para ajustar el modelo. Es por esto se deben tomar precauciones como realizar mapas de las áreas donde se proyectan climas futuros sin análogos actuales, utilizando las herramientas apropiadas para caracterizar la novedad de los climas futuros y/o utilizar métodos que permitan identificar las predicciones realizadas por extrapolación (Platts et al., 2008; Fitzpatrick & Hargrove, 2009; Elith et al., 2010; Zurell et al., 2012). Al tomar estas precauciones y utilizar métodos que se comporten de manera moderada y predecible al extrapolarlos (p.ej., superficies de respuesta climática ajustadas a través de regresión ponderada localmente, que hacen predicciones más allá del alcance del dominio de ajuste que son asintóticas a los valores de margen del dominio, (Huntley et al., 2007)) se evitan los errores asociados a métodos que tienden a proporcionar predicciones irreales fuera del dominio de ajuste (p.ej., modelos lineales generalizados que utilizan relaciones polinómicas pueden generar curvas de respuesta para las variables individuales que predicen el aumento, la disminución o el no cambio de la aptitud ambiental de regiones que se encuentran más allá del intervalo de los datos de entrenamiento, de las cuales, algunas o todas las predicciones pueden ser realistas o completamente irreales).

Otra fuente importante de incertidumbre son los sesgos en los registros o celdas de presencia utilizadas para preparar el modelo correlativo. A escala global, los esfuerzos de recolección de datos se concentran con frecuencia en las áreas donde existe un nivel alto de endemismo, cerca de las instituciones de investigación y en los países más ricos (Meyer et al., 2015); mientras que a escalas más pequeñas, la recolección de datos se concentra en las áreas de acceso (carreteras, ríos) y cerca de centros poblados importantes (Phillips et al., 2009). Tal como discutimos en la Sección 5.1.4 Datos de distribución de las especies, existen métodos para eliminar estos sesgos. No obstante, puede ser difícil diferenciar los sesgos de muestreo de diferencias genuinas en la densidad de las especies en su área de distribución, por lo que se introduce incertidumbre.

Una fuente adicional de incertidumbre emerge en el caso de los modelos que usan datos de solo presencia en contraposición a los que utilizan datos de presencia y ausencia, porque la mayoría de estos métodos no utilizan solo las presencias, sino que también deben utilizar pseudo-ausencias y sitios de contexto para ajustar

**Figura 10.** Matriz de confusión

Predicciones del modelo	Observaciones	
	Presencia	Ausencia
Presencia	a	b
Ausencia	c	d

un modelo (Elith et al., 2006), y todos requieren de estos datos para evaluar las medidas convencionales de bondad de ajuste del modelo que se basan en los cuatro valores de la matriz de confusión (Figura 10). Las pseudo-ausencias son sitios seleccionados de una forma que intenta garantizar que una especie no se encuentra en un lugar (aunque no se hayan hecho esfuerzos de búsqueda en ese sitio) y se utilizan como sustitutos de ausencias “reales”. En contraste, se pueden ubicar sitios de contexto en un paisaje, independientemente de si una especie se encuentra presente o ausente en un lugar particular. Algunos algoritmos pueden utilizar las pseudo-ausencias o los sitios de contexto (p.ej., los modelos de aditivos generalizados y los modelos lineales), mientras que otros métodos solo deben ser utilizados con sitios de contexto (p.ej., Maxent; Merow et al., 2013). La manera en que se seleccionan estas pseudo-ausencias o sitios de contexto varía, y la selección de métodos diferentes resulta en modelos que difieren con respecto al desempeño y la robustez de sus predicciones (Phillips et al., 2009). En muchos casos la extensión general del espacio climático definido para el ajuste determina el espacio de selección de las falsas ausencias o sitios de contexto, pero mientras más grande sea, menos bien limitada estará la extensión climática “real” de las especies, lo que muchas veces resulta en proyecciones de áreas de distribución muchos más extensas de lo que se observan en realidad. Royle et al. (2012) informaron de una tendencia similar del ampliamente usado método MAXENT y presentaron un método alternativo basado en verosimilitud, MAXLIKE, el cual no presenta este problema.

Se utilizan los valores a–d para calcular las medidas de bondad de ajuste, p.ej., la sensibilidad (Se) o proporción de presencias correctamente proyectadas, especificidad (Sp) o proporción de ausencias correctamente predichas, o el estadístico de desempeño verdadero (TSS, por sus siglas en inglés):

$$Se = a / (a + c)$$

$$Sp = d / (b + d)$$

$$TSS = \left( \frac{a}{a + c} \right) + \left( \frac{d}{b + d} \right) - 1$$

## 6.6.2 Enfoques basados en rasgos

En las evaluaciones basadas en rasgos existen incertidumbres en muchas de sus etapas, entre ellas: los rasgos seleccionados para inferir la vulnerabilidad; los umbrales elegidos para calcular la vulnerabilidad asociada a cada especie; los sistemas de ponderación que se utilicen o no para priorizar ciertas características o calificaciones y el sistema utilizado para combinar las calificaciones de los rasgos en calificaciones, rangos o categorías generales de vulnerabilidad. En las Secciones 5.1.5 (Selección y uso de los datos de rasgos de las especies) y 6.5 (Incetidumbre en los rasgos biológicos y los datos demográficos) discutimos las maneras en las que se pueden calcular y representar estas incertidumbres. Notamos que los rasgos tienden a interactuar entre sí y con los

cambios climáticos de manera no lineal y específicas al contexto. A fin de considerar esto, todos los enfoques de EVCC deben basarse en estudios detallados de campo, de los cuales hasta la fecha, existen muy pocos. La realización de más de estos estudios y el desarrollo de más modelos mecanicistas (p.ej., Keith et al., 2008; Morin et al., 2008) serían pasos adecuados para comenzar a abordar esta incertidumbre (Foden et al., 2013).

## 6.7 Validación de la EVCC

Evaluar la fiabilidad de las EVCC es importante, tanto para entender sus incertidumbres, como para mejorar su desempeño en aplicaciones futuras. Parece que, hasta la fecha, solo se han validado los métodos correlativos utilizando los modelos de distribución de especies, aunque los enfoques de validación aplicados tienen potencial para ser utilizados en otros métodos. El principio básico subyacente de la mayoría de estos enfoques de validación es ajustar un modelo a solo una parte de las observaciones disponibles y utilizarlo para predecir las observaciones que no se utilizaron en el ajuste. No obstante, se pueden reconocer al menos tres variantes diferentes a este enfoque.

El enfoque más común utiliza observaciones de solo una región e intervalo temporal discretos, ajustando los modelos varias veces a subconjuntos de esas observaciones seleccionadas aleatoriamente (p.ej., 70%) y utilizar cada modelo para predecir las observaciones que fueron excluidas al momento del ajuste; evaluando el desempeño del modelo a través del éxito con el que predice las observaciones excluidas (p.ej., Pearson et al., 2007; Hole et al., 2009; Araújo et al., 2011; García et al., 2012). Idealmente, los modelos son ajustados a un gran número (p.ej., 100, Hole et al., 2009) de subconjuntos aleatorios pese a que con frecuencia, el número utilizado es más pequeño (p.ej., 10, Araújo et al., 2011) y pareciera que algunos autores solo hicieron una división aleatoria de sus datos (aunque hoy en día es cada vez menos común). Esto es potencialmente peligroso ya que una división aleatoria puede sobreestimar, o subestimar, el desempeño de un modelo. El poder de predicción de cada modelo se evalúa utilizando una o más medidas de bondad de ajuste (p.ej., el área bajo la curva de la característica operativa del receptor (AUC, por sus siglas en inglés, Metz 1978); la kappa de Cohen (K, Cohen, 1960); el estadístico de desempeño verdadero (TSS, Allouche et al., 2006). El ajuste múltiples modelos permite la evaluación de la tendencia central y la dispersión de los valores para las medidas de bondad de ajuste, lo que proporciona un indicador de la incertidumbre que surge de la selección de las observaciones utilizadas en el ajuste del modelo. Este enfoque de validación cruzada ayuda a evitar los modelos sobreajustados ya que los modelos que obtienen una alta bondad de ajuste al ser ajustados a todas las observaciones, generalmente no son robustos al realizar esta validación. Se deben preferir los modelos que se desempeñan bien en la validación cruzada ya que probablemente suministren predicciones más confiables cuando predigan un futuro climáticamente cambiado.

Un enfoque alternativo, pero que rara vez es utilizado, es utilizar las observaciones de una región geográfica para ajustar un modelo y luego utilizarlo para predecir la distribución de las especies en una región geográfica diferente (p.ej., Beerling, David J., Huntley,





La hormiga *Lasius balearicus*, la cual fue descrita como nueva especie en 2014, es una especie que solo se encuentra en las cimas más altas (de 800m a 1400m por encima del nivel del mar) de las montañas de la Serra de Tramuntana en Mallorca, España. Se considera que la especie se encuentra en peligro de extinción debido a su rango extremadamente pequeño y que los modelos correlativos predicen disminuciones en la adecuación del rango debido al cambio climático por lo que se puede extinguir pronto. ©Roger Vila

Brian & Bailey, 1995). Este enfoque hace el supuesto de que las especies han sido capaces de expresar el mismo nicho climático en ambas regiones, lo que no sería necesariamente verdad si las regiones en cuestión difieren sustancialmente en el intervalo de condiciones climáticas que ofrecen. En el ejemplo citado se utilizó una especie introducida, lo que requirió el supuesto adicional de que la especie había ocupado por completo su nicho potencial realizable en la región en la que había sido introducida. Una variación de este enfoque es ajustar el modelo al área de distribución observada conocida de una especie y luego probar la capacidad del modelo para predecir lugares aún no registrados para las especies (p.ej., Busby, 1991), o poner a prueba la capacidad del modelo para predecir lugares adecuados, pero hasta ahora desocupados, realizando introducciones deliberadas en estos y evaluar si las especies son o no capaces de establecer una población y desarrollarse en ellos (p.ej., Willis et al., 2009).

Un enfoque más ampliamente utilizado ajusta un modelo a las observaciones de un período y lo utiliza para predecir en forma retrospectiva (p.ej., Hill et al., 1999) o prospectiva (p.ej., Araújo et al., 2005; Morelli et al., 2012; Bled et al., 2013; Watling et al., 2013) la distribución de la especie en un período anterior o futuro. Luego se evalúan las proyecciones del modelo para el período



*Lasius balearicus*. © Gerard Talavera

cuyos datos no fueron utilizados para ajustarlo, utilizando las observaciones de ese período ya sea cualitativamente, en términos de una comparación amplia visual en los casos en los que no se pueda realizar o sea inapropiada una comparación sistemática o, como antes, utilizando medidas apropiadas de bondad de ajuste.



En principio se puede extender este enfoque para utilizar métodos ajustados a las distribuciones presentes de las especies a fin de obtener información retrospectiva de sus distribuciones potenciales en períodos de finales del Cuaternario, los cuales son luego comparados con los registros fósiles disponibles. Sin embargo, la falta general de fósiles identificados a nivel de las especies limita gravemente la aplicación de este enfoque. No obstante, la información retrospectiva puede suministrar intuiciones útiles sobre los áreas de distribución potenciales pasadas de las especies que pueden ayudar a comprender sus distribuciones y conductas actuales (p.ej., Ruegg et al., 2006; Huntley et al., 2014).

Un enfoque de validación alternativo implica ajustar un modelo a las observaciones de presencia y ausencia de un período y utilizarlo para predecir en forma prospectiva/retrospectiva los cambios, no en la presencia o ausencia de las especies, sino en los valores crudos de aptitud climática producidos por el modelo. Luego, los cambios predichos en la aptitud climática pueden ser comparados con los cambios observados en los tamaños poblacionales de las especies (p.ej., Green et al., 2008; Gregory et al., 2009). Este enfoque permite la validación robusta y convincente del enfoque correlativo, pero solo se puede utilizar en áreas y para especies

con conjuntos de datos buenos, normalmente monitoreos de largo plazo (p.ej., las aves raras crían en el Reino Unido, Green et al., 2008; las aves que crían en Europa, Gregory et al., 2009). Un enfoque relacionado compara los valores proyectados con medidas como el tamaño corporal, la fecundidad u otras medidas de adecuación poblacionales (p.ej., Wittmann et al., 2016).

Los estudios que muestran que los área de distribución de las especies han seguido los cambios climáticos en el siglo pasado (p.ej., Tingley et al., 2009; Chen et al., 2011) suministran la evidencia que avala la robustez general de esta expectativa (Huntley & Webb, 1989). Estos estudios respaldan la validez del enfoque general utilizado por los métodos de EVCC basados en los modelos de distribución de las especies aun cuando no se realice la validación formal del modelo en el sentido descrito anteriormente. El uso de esta validación basada en la observación es una prioridad importante para aquellos que desarrollan y utilizan los enfoques basados en rasgos. Sin embargo, la necesidad de datos observacionales, limitan el uso de los cambios recientemente observados para la validación de EVCC a áreas y especies registros de datos de alta calidad y a largo plazo.

El árbol de Josué (*Yucca brevifolia*) se encuentra amenazado por el aumento de las temperaturas y la disminución de la pluviosidad en su hábitat desértico al suroeste de América del Norte. Se prevé que el rango de este árbol inusual se contraerá hacia los polos (hacia el norte) y se dividirá en poblaciones aisladas. A pesar de que algunas simulaciones proyectan la expansión hacia un nuevo hábitat, las tasas de dispersión observadas (actuales e históricas) parecen indicar que no podrán hacerlo. ©kevinschafer.com



# 7. La Lista Roja de UICN y la vulnerabilidad al cambio climático

Wendy B. Foden y Resit Akçakaya

La Lista Roja de UICN está considerada ampliamente como el sistema de mayor autoridad para clasificar las especies según su vulnerabilidad al riesgo de extinción. Los criterios de la Lista Roja de UICN se basan en síntomas de amenaza (Mace et al., 2008); se pueden aplicar a cualquier proceso que genere amenazas, incluyendo el cambio climático, que resulta en síntomas como decrecimiento poblacional, pequeños tamaños poblacionales, y pequeñas distribuciones geográficas. Una especie puede clasificada como amenazada según la Lista Roja de UICN aun cuando no se pueda identificar el proceso de amenaza.

Este enfoque basado en síntomas es particularmente útil para manejar los impactos del cambio climático por dos razones principales. Primero, el cambio climático es una amenaza que ha sido poco estudiada y por ende, poco conocida; por lo que no siempre es posible identificarlo como la causa de vulnerabilidad o riesgo de una especie (Parmesan et al., 2011). También es difícil entender las relaciones causales (mecanismos) que vinculan al cambio climático con la respuesta biológica a nivel poblacional o de especies y tomarlas en cuenta junto a otros impactos como la pérdida del hábitat, la explotación y las enfermedades. Un sistema basado en síntomas supera estas dificultades centrándose en los cambios a nivel de la población y las especies, en vez de tratar de comprender las causas de las disminuciones. La segunda ventaja se relaciona con los impactos que tiene la adaptación de los humanos al cambio climático, como los cambios en la agricultura y la urbanización, sobre las especies. Estas respuestas son difíciles de predecir pero pueden ser tan importantes como los efectos directos que tiene el cambio climático sobre la biodiversidad (Chapman et al., 2014; Maxwell et al., 2015; Segan et al., 2015). Dado que los criterios de la Lista Roja no distinguen entre los síntomas (como la disminución de la población o las contracciones de las área de distribución) que son causados directamente por el cambio climático o los causados por las respuestas humanas, se podrían identificar con igual efectividad las especies amenazadas por lo último (Akçakaya et al., 2014). Aunque identificar las conexiones causales puede ser importante para mitigar las amenazas, un enfoque basado en síntomas será eficiente y preciso como primer paso para identificar las especies vulnerables a la extinción (debido al cambio climático o cualquier otra amenaza).

## 7.1 Usando los resultados de la EVCC en la Lista Roja de UICN

El Subcomité de Normas y Peticiones de UICN desarrolló y mantiene directrices para utilizar la Lista Roja de UICN, incluyendo su uso en el contexto del cambio climático (IUCN SSC Standards and Petitions Subcommittee, 2016); consulte el Cuadro 5. No duplicamos estas directrices aquí, ya que son extensivas, han sido

ampliamente revisadas y ya cubren la información necesaria sobre las Listas Rojas en el contexto del cambio climático. En vez de eso, nos enfocamos en describir tres tipos de escenarios que pueden encontrar los usuarios destacando cómo utilizar la evaluación de la Lista Roja en cada uno. Hacemos notar que las dificultades principales que tienen las personas que utilizan los resultados de las EVCC al aplicar los criterios de la Lista Roja de UICN son la interpretación de las definiciones de UICN y cómo relacionarlas

### Cuadro 5. El cambio climático y las directrices para utilizar las categorías y los criterios de la Lista Roja de la UICN

<http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>

**Las 'directrices para utilizar las categorías y los criterios de la Lista Roja de UICN', muchas veces referidas como las Normas de la Lista Roja de UICN, proporcionan una guía detallada sobre los asuntos y desafíos específicos relacionados a las consideraciones del cambio climático en las Listas Rojas. Fueron desarrolladas por la CSE del Subcomité de Normas y Peticiones de UICN y se actualizan al menos una vez al año por lo que se alienta a los evaluadores a consultar su última versión antes de realizar las evaluaciones. La Sección 12 presenta guía sobre los procesos de amenazas y la Sección 12.1 se enfoca en el cambio climático. A continuación presentamos los temas cubiertos en esta sección al momento de su redacción (Versión 12 (2016)) a fin de proporcionar a los lectores un resumen sobre la información que encontrarán allí. Sin embargo, dado que se actualizan las Directrices de la Lista Roja con más frecuencia que las de EVCC recordamos a los usuarios, una vez más, que deben revisar la última versión en línea.**

#### 12.1 CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL

##### 12.1.1 Horizontes temporales

##### 12.1.2 Pasos sugeridos para aplicar los criterios ante el cambio climático

##### 12.1.3 Mecanismos

##### 12.1.4 Distribución muy limitada y plausibilidad e inmediatez de la amenaza (VU D2)

##### 12.1.5 Definición de "Localización" con respecto al cambio climático (B1, B2, D2)

##### 12.1.6 Fragmentación severa (B1, B2, C1 y C2)

##### 12.1.7 Fluctuaciones extremas (B1, B2, C1 y C2)

##### 12.1.8 Infiriendo la reducción de la población y la disminución continua (A3, A4, B1, B2, C2)

##### 12.1.9 Infiriendo reducciones por medio de modelos bioclimáticos (A3, A4)

##### 12.1.10 Infiriendo reducciones por medio de cambios demográficos

##### 12.1.11 Estimando el riesgo de extinción en forma con modelos poblacionales y de hábitat acoplados (E)

##### 12.1.12 Usando modelos bioclimáticos



con los resultados de los modelos. Este tema es ampliamente analizado en un artículo titulado: “Uso adecuado e inadecuado de los criterios de Lista Roja de UICN para la proyección de los impactos de cambio climático en la biodiversidad” (“Use and Misuse of the IUCN Red List Criteria in Projecting Climate Change Impacts on Biodiversity”) (Akçakaya et al., 2006).

Los estudios recientes muestran que los criterios de la Lista Roja de UICN pueden identificar las especies vulnerables a la extinción por el cambio climático, gracias a su enfoque basado en síntomas, aun cuando no se considera el cambio climático específicamente. Pearson et al. (2014) utilizaron un modelo demográfico correlativo, en un estudio sobre los reptiles y los anfibios norteamericanos, para probar que se puede predecir el riesgo de extinción por el cambio climático a través de información que se encuentra disponible actualmente, como el área ocupada y el tamaño de la población, mucha de la cual es utilizada en los criterios de la Lista Roja. Por otro lado, Stanton et al. (2015) demuestra que los criterios de la Lista Roja de UICN permiten identificar las especies que se extinguirían debido al cambio climático y sin que se desarrollen acciones de conservación, y que pueden lograrlo con décadas de período de alerta. El período de alerta se define como el tiempo que transcurre entre el momento en que una especie es identificada como amenazada por primera vez y el tiempo de extinción (asumiendo que no hubo acciones de conservación) y corresponde al tiempo disponible para determinar la causa de la disminución y tomar medidas de conservación para abordar la amenaza y evitar la extinción de la especie.

Ha habido preocupación respecto de que los criterios de la Lista Roja puedan no ser adecuados para evaluar las especies amenazadas por el cambio climático, principalmente porque muchas de las especies que se proyecta que tendrán contracciones considerables de área de distribución, en las próximas décadas, tienen tiempos generacionales muy cortas como para activar

los criterios relevantes de UICN, los cuales consideran decrecimientos en un período de tres generaciones (Akçakaya et al., 2006). Sin embargo, Keith et al. (2014) comprobaron que los períodos de advertencia eran suficientes para una especie de anfibio australiano de corta vida y Stanton et al. (2015) evidenciaron que el hecho de que las generaciones fueran más cortas no disminuía la capacidad de la Lista Roja de predecir el riesgo a extinción causado por el cambio climático.

Tres factores importantes aumentan la capacidad de la Lista Roja de predecir el riesgo de extinción por el cambio climático. El primero es la calidad y la cantidad de información utilizada para la elaboración de la Lista Roja. La falta de información generalmente causa que solo se utilice un criterio para evaluar el estado de una especie, lo que es problemático dado que Keith et al. (2014) y Stanton et al. (2015) comprobaron que al hacerlo, se obtienen períodos de advertencia más cortos. Stanton et al. (2015) demostraron que pese a que el período de advertencia promedio es de más de 60 años cuando se utilizan todos los criterios, al utilizar solo uno, es de solo 20 años. Lo segundo es que la detección y uso de los síntomas de cambios en la población y los amaños de las áreas de distribución requiere de un monitoreo regular de la especie (Keith et al., 2014). La naturaleza de la amenaza y el concepto de ‘períodos de advertencia’ también implican que es importante reevaluar las especies que ya se encuentran en la Lista Roja regularmente. Esto es especialmente importante para las situaciones en las que existen muy pocos datos. Akçakaya et al. (2014) y Stanton et al. (2015) demostraron, por ejemplo, que cuando la falta de datos permite que se utilice solo un criterio, realizar nuevas evaluaciones en intervalos anuales o de 5 años, en vez de 10 años, aumenta considerablemente los períodos de advertencia. Finalmente, el período de advertencia será probablemente muy corto si se comienzan las acciones de conservación solo cuando la especie se encuentra en la categoría más alta de amenaza de UICN (En Peligro Crítico).

Se realizó una reunión del grupo de trabajo sobre la Crisis de los Corales en Royal Society, Londres, en julio de 2009. Co-presidido por Sir David Attenborough, los especialistas en arrecifes de coral y cambio climático desarrollaron siete puntos claves sobre la vulnerabilidad de los arrecifes de coral al cambio climático a nivel global. Luego, Sir Attenborough comunicó a la prensa y a través de una publicación secundaria los puntos en una declaración de posición de emergencia. Izquierda: coral cacho de venado ©Lyndon Devantier. Derecha : Reunión del grupo de trabajo sobre la crisis de corales © Sonia Khela





## 7.2 Tres escenarios de usuarios para la consideración del cambio climático en las Listas Rojas

Comenzamos con el escenario más simple, orientado hacia un contexto de pocos recursos y continuamos hacia los que tienen más recursos disponibles.

*Escenario 1: Considere los rasgos ecológicos y biológicos de la especie para determinar los probables mecanismos asociados a los impactos del cambio climático y cuantificarlos usando el conocimiento de expertos*

El cambio climático puede afectar las poblaciones a través de muchos mecanismos y analizar cómo afectará taxones específicos puede aclarar los parámetros y criterios relevantes para la evaluación de la Lista Roja. En este escenario, puede que el evaluador no tenga los datos o la experiencia para elaborar modelos de los impactos del cambio climático, pero sí tiene información sobre la fisiología, el comportamiento y la ecología de la especie focal. Los evaluadores deben considerar esta información para determinar los mecanismos probables de impactos directos e indirectos del cambio climático, los que resultan de las interacciones del cambio climático con otras amenazas (p.ej., especies invasoras, pérdida de hábitat) y los impactos de las respuestas humanas al cambio climático.

A fin de aplicar los criterios de la Lista Roja, los evaluadores deben calcular los impactos que tienen estos mecanismos en las especies y determinar si cumplen con los umbrales de las categorías de amenaza de la Lista Roja. Para hacer esto, recomendamos que los evaluadores clasifiquen los mecanismos enumerados según el grado y la probabilidad de impacto y, en el caso de los mecanismos o amenazas dominantes, que calculen su plausibilidad (que tan probable es que ocurra el impacto), inmediatas (cuán pronto se espera que ocurra el impacto), alcance geográfico (dónde es probable que impacten) y la gravedad (en qué medida afectarán la población o rango de distribución de una especie). Las Normas de la Lista Roja proporcionan una guía detallada sobre cómo realizar esto y cómo se deben interpretar conceptos como “localización”, “severamente fragmentado”, “fluctuaciones extremas”, “reducciones poblacionales”, “distribución muy limitada” y “disminución continua” en este contexto. La justificación de estos estimados o proyecciones deben ser debidamente justificados en los razonamientos de evaluación y de amenazas. Dado que parte de esta información puede estar basada en el conocimiento de expertos, se debe buscar la participación de tantos expertos como sea posible y se debe alcanzar un consenso, siempre que se pueda. Hay que tomar en cuenta que muchas de las variables utilizadas en este proceso (como la ubicación, fragmentación severa, distribución limitada) requieren información espacial y el cálculo de otras (en particular la reducción y la estimación de una disminución continua) debe considerar la variabilidad de las tasas de cambio en el área de distribución de la especie. Por consiguiente, en este escenario se deben considerar mapas detallados del área de distribución de la especie y otro tipo de datos espaciales explícitos.

*Escenario 2: Uso de los resultados de un modelo correlativo para calcular los impactos del cambio climático en el área de distribución de la especie*

En los casos en que están disponibles los resultados de un modelo correlativo o cuando los evaluadores puedan realizar estos estudios, estos representan una manera útil de proyectar y calcular los impactos directos de los cambios bioclimáticos sobre el área de distribución de las especies. Esto es especialmente útil para predecir las disminuciones en las áreas de distribución y se pueden utilizar para inferir los cambios en los tamaños de las poblaciones. Las Directrices de la Lista Roja de UICN (Sección 12.1.12: Usando los modelos bioclimáticos) proporcionan directrices específicas sobre cómo derivar e interpretar estos dos componentes de los modelos, así como su uso para evaluar las especies en las categorías de amenaza. La Sección 4.1, por su parte, proporciona los pasos para evaluar la robustez de los datos y los métodos utilizados en los resultados de modelos existentes; mientras que las Secciones 5 y 6 suministran una guía para aquellos que desean elaborar sus propios modelos bioclimáticos. Una consideración importante es que la selección de las variables predictivas a incluir en estos modelos debe ser informada a través de los mecanismos probables de impacto del cambio climático descritos en el escenario 1.

Es importante considerar que los modelos correlativos normalmente se enfocan solo en los impactos climáticos directos del cambio climático y no se consideran impactos derivados de aspectos como cambios en las interacciones de las especies, la interrupción de señales climáticas, la interacción del cambio climático con otras amenazas y las respuestas humanas al cambio climático. Las Directrices de la EVCC discuten la manera en que los modelos bioclimáticos pueden y han sido combinados con modelos basados en rasgos y demográficos para considerar otros mecanismos posibles de impactos. También se puede mejorar la comprensión de los posibles cambios en las interacciones con otras especies elaborando modelos bioclimáticos sobre las especies claves que interactúan (p.ej., presas o polinizadores). Sin embargo, para explorar minuciosamente el intervalo completo de los impactos potenciales del cambio climático, recomendamos que los evaluadores también realicen un inventario completo de los posibles mecanismos de impacto que afectarán la especie focal (consulte el Escenario 1) y que utilicen las Directrices de la Lista Roja para interpretar cómo se pueden contabilizar para que contribuyan con la evaluación de Lista Roja.

*Escenario 3: Uso de los resultados de un modelo mecanicista para calcular los impactos del cambio climático sobre las poblaciones y el área de distribución de la especie*

En los casos en los que están disponibles los resultados de modelos mecanicistas o que los evaluadores puedan elaborar los modelos, estos pueden representar una forma útil para predecir y calcular los impactos directos e indirectos del cambio climático sobre un intervalo de posibles parámetros de las especies, tales como el tamaño de las poblaciones, áreas de distribución, interacciones interespecíficas y el riesgo general de extinción de las especies. Existen modelos mecanicistas para unas pocas especies solamente, debido a que normalmente requieren datos y experiencia considerables.

En la mayoría de los casos, el componente espacial se basa en los resultados de los modelos correlativos, por lo que este paso depende del previo y se deben consultar las secciones pertinentes de las Directrices de Lista Roja y de las de EVCC. Además, también se deben revisar los componentes del modelo demográfico. Pocos modelos pueden incluir todos los efectos directos, indirectos y los

efectos interactivos del cambio climático sobre la especie focal, por lo que también recomendamos que los evaluadores realicen un inventario de los mecanismos de impacto (descritos en el Escenario 1) a fin de identificar cualquier otra amenaza adicional potencial causada por el clima.

Se espera que los aumentos de temperaturas y el cambio de la estacionalidad de las precipitaciones aumente la frecuencia e intensidad de los incendios en Cape Floral Kingdom, en Suráfrica, afectando especies como el Protea rey (Protea cynaroides). © Wendy Foden



# 8. Comunicando los resultados de las EVCC

David Bickford, Bruce E. Young, Jamie Carr, David Hole, y Stuart Butchart

La comunicación efectiva de los resultados de las EVCC requiere de análisis y cuidado, especialmente considerando la controversia que algunas veces rodea al tema del cambio climático. Al igual que para los análisis de la evaluación de vulnerabilidad, esta comunicación debe garantizar que se expliquen las incertidumbres claramente, se describan las vulnerabilidades explícitamente y que se presenten los resultados de tal forma que faciliten su uso para el desarrollo de estrategias de adaptación. En este apartado, hacemos sugerencias para el desarrollo de estrategias de divulgación efectivas de las EVCC y sus resultados. Nuestras sugerencias incluyen la identificación y focalización de audiencias específicas, la estructuración adecuada de los resultados con contenido pertinente y figuras útiles, el uso efectivo de diferentes medios y métodos, y la expresión clara y concisa de los riesgos y las incertidumbres.

El primer paso es identificar la audiencia o audiencias que desea abordar. A pesar de que con frecuencia, una EVCC puede tener varias partes interesadas, los productos de divulgación deben estar estrictamente dirigidos a audiencias específicas, potencialmente necesitando varios productos para una sola evaluación. Se debe considerar el conocimiento y los antecedentes científicos, biológicos y sobre el cambio climático de las audiencias y los tipos de información que les son más relevantes. La **Tabla 11** enumera ejemplos de las posibles audiencias de la EVCC, la información que probablemente sea más relevante para ellas y sugerencias sobre los métodos y medios adecuados para informar los resultados a cada una. Es importante considerar que muchas veces es necesario utilizar diferentes medios y métodos para una divulgación

efectiva, incluso para solo una audiencia, y casi siempre, al abordar diferentes audiencias. Focalizar sus audiencias también significa comprenderlas, por lo que necesita algo de previsión y planificación para pensar sobre los sesgos, la receptividad a resultados potenciales de las EVCC, y otros factores pertinentes para obtener la atención o interés de los destinatarios (p.ej., socioeconómicos, temporales, espaciales, políticos). En resumen, para focalizar sus audiencias debe adaptar los métodos, medios y contenido a su grupo objetivo, entendiendo los sesgos y otras inquietudes que puedan tener sobre los resultados de una EVCC.

Segundo, los autores deben considerar la información a comunicar. Lo que se va a comunicar depende de la audiencia, pero puede ser clasificado de manera general en algunos factores importantes (ver Gross et al., 2016). Entre estos factores se encuentran las implicaciones económicas, sociales y para la conservación del cambio climático en la escala o intensidad relevante para las audiencias. Otro factor importante a considerar es la probabilidad, reversibilidad, temporalidad y potencial de adaptación a los impactos y vulnerabilidades del cambio climático. Si bien muchos de estos factores serán específicos para un grupo de interés particular, se debe considerar el alcance de estas categorías para cada audiencia.

Además de describir el(los) grado(s) de vulnerabilidad de las especies evaluadas y las implicaciones para las intervenciones de conservación centradas en las especies o los lugares, los autores quizás deseen describir los métodos utilizados, los vacíos de datos encontrados y las incertidumbres de los resultados. Incluir los

**Tabla 11.** Ejemplos de las audiencias de las EVCC, los tipos de información que requieren, y algunos medios de comunicación útiles para informarles sobre las EVCC y sus resultados.

Audiencia	Información relevante	Medios o métodos de comunicación apropiados
Público general o múltiples grupos de interés	Conclusiones generales y mensajes simples y fundamentales sobre las vulnerabilidades claves; datos básicos y análisis	Presentaciones orales /reuniones con sesiones de preguntas y respuestas; notas de prensa para medios de difusión masivos; redes sociales; artículos populares
Administradores de conservación de especies y lugares	Conclusiones específicas; sugerencias de estrategias de adaptación para especies específicas, lugares y redes de sitios; datos y análisis profundos; áreas de incertidumbre; deficiencia de datos	Reuniones; publicaciones (en literatura gris y revisada por pares); documentos normativos
Legisladores, agencias donantes	Conclusiones generales; mensajes simples y fundamentales; implicaciones para las políticas	Presentaciones orales /reuniones con sesiones de preguntas y respuestas; notas de prensa y cartas al editor dirigidas a medios de difusión masiva; foros sobre políticas, redes sociales; documentos informativos <sup>1</sup>
Científicos e investigadores	Conclusiones específicas; datos y análisis; problemas y limitaciones metodológicas; sugerencias para mejorar las EVCC; áreas de incertidumbre	Publicaciones científicas internacionales revisadas por pares; presentaciones orales en reuniones científicas; redes sociales

<sup>1</sup> En muchos ámbitos políticos, se necesita un documento publicado en la literatura científica o un informe formal para respaldar las conclusiones presentadas, de manera más abreviada, a los legisladores.

detalles de modelos complicados puede ser apropiado para los científicos e investigadores, pero en un documento informativo o para un grupo de la comunidad, será suficiente incluir solo una breve descripción de estos. Se debe incluir información útil para el diseño de estrategias de adaptación como las tolerancias fisiológicas, las historias de vida y/o los contextos geográficos de las especies a fin de apoyar el desarrollo e implementación de acciones de conservación. En el caso de los profesionales de la conservación, los resultados explícitos desde el punto de vista espacial son útiles para el desarrollo de las estrategias de adaptación, y los mapas que representan estos resultados deben incluir un contexto espacial (límites políticos, carreteras, límites de áreas protegidas y áreas pobladas) con el que se puedan relacionar los destinatarios.

Una tercera sugerencia es que los autores piensen cómo comunicar y utilizar efectivamente los medios y apoyos visuales disponibles (p.ej., gráficos, tablas, mapas y figuras) para la divulgación. Un medio poderoso de comunicación es utilizar colores en los gráficos para indicar la vulnerabilidad relativa de las especies evaluadas y barras de error para indicar los límites de incertidumbre (p.ej., Dubois et al., 2011). Cada vez más los líderes de proyectos están utilizando videos cortos para describir sus resultados al público en general. Utilizar segmentos emotivos de la fauna y testimonios de agricultores afectados por el cambio climático ayuda a que un público más amplio se conecte con estos videos. Los medios como los informes breves, los gráficos y las tablas de resumen pueden transmitir rápidamente complejidades que son difíciles de explicar de otras maneras. Al escribir, los autores deben prestar atención a articular los términos claramente y evitar el uso de acrónimos que no hayan sido definidos o de jerga técnica compleja. Un medio cada vez más útil para la divulgación de resultados a un público amplio son las redes sociales. Por ejemplo, las publicaciones en Twitter, Facebook e Instagram con imágenes, gráficos y videos llamativos pueden invitar al público a revisar informes más detallados, notas informativas e informes periodísticos sobre los resultados de las evaluaciones de vulnerabilidad y permitir la popularización de ideas que de otra manera serían ignoradas en los procesos de tomas de decisiones.

Finalmente, es importante estar conscientes de los problemas inherentes a la divulgación de los resultados de EVCC. Dos tipos particulares de contenido a los que se debe prestar especial atención son los que abordan la incertidumbre y la vulnerabilidad. La incertidumbre científica es muy diferente al uso común del término y este punto debe ser recalcado claramente para cierto público. Aunque se debe hablar sin tapujos sobre la incertidumbre, alentamos a los autores a esclarecer que la incertidumbre no significa ignorancia. De ser posible, también los alentamos a calcular la incertidumbre y a suministrar descripciones de lo que se conoce y de las incertidumbres a través de ejemplos de por qué algo puede ser incierto. Por ejemplo, se puede tener datos muy robustos que indican la manera en que una especie reaccionará ante un gradiente de humedad del suelo, mostrando una clara preferencia por un tipo específico de hábitat húmedo (p.ej., 75% de humedad del suelo). Sin embargo, igual puede ser incierto cómo el cambio climático afectará la humedad del suelo de un área específica y por ende, también será incierta la respuesta de las especies que se encuentran allí. Otro ejemplo es la elevación

del nivel del mar. Estamos muy seguros de que el nivel del mar aumentará; pero no tan seguros sobre la magnitud del aumento. Una manera apropiada de informar estos resultados de EVCC sería incluir escenarios que abarquen las respuestas conocidas (o probables) de las especies por hábitats húmedos, la probabilidad de que esos hábitats sean afectados, y las incertidumbres sobre cómo las especies responderán a las nuevas condiciones cuando no puedan encontrar sus hábitats preferidos. La incertidumbre no se encuentra en las preferencias de las especies, sino en cómo cambiarán los hábitats y cómo responderán las especies al nuevo clima. Puede ser útil enfatizar principalmente lo que conocemos basados en la aplicación de los principios de la ecología, física y/o química, con muy poca incertidumbre.

Reiteramos que las EVCC suministran información para la planificación de la adaptación y la gestión de la conservación pero que no los sustituyen. Las EVCC determinan e informan los resultados de las evaluaciones de vulnerabilidad pero no necesariamente incluyen recomendaciones de gestión. Esto se debe a que las decisiones de gestión también se deben formular considerando otros factores adicionales que son independientes de la EVCC (p.ej., los elementos no climáticos de estrés, el presupuesto disponible, la capacidad humana y los derechos legales y de usufructo). En resumen, aunque ciertamente las EVCC facilitan el desarrollo de estrategias de adaptación y planes de gestión, se debe tomar en consideración que estas actividades están fundamentalmente separadas.

La introducción de métodos nuevos y más efectivos para informar las incertidumbres ayudará a reducir las brechas entre los que realizan las EVCC y sus audiencias objetivo. Es clave aprender más sobre las audiencias para poder abordarlas al igual que es importante entender sus sesgos y visiones del mundo. A través de la comunicación efectiva y focalizada de los resultados de las evaluaciones de vulnerabilidad podemos aumentar la probabilidad de que se utilicen para el diseño y la implementación de estrategias de adaptación efectivas para proteger a las especies vulnerables e inspirar esfuerzos para llenar la falta de datos.



# 9. Direcciones futuras de las EVCC de especies

Wendy B. Foden, James Watson, Ary Hoffmann, Richard Corlett, y David Hole

Como un nuevo campo emergente de la biología y la ecología, la EVCC enfrenta muchas limitaciones que pueden ser frustrantes, pero a la vez, representan oportunidades emocionantes para aquellos que desean utilizarlas y desarrollarlas. A continuación presentamos algunas recomendaciones claves para trabajar en el avance de este campo.

## 9.1 Validación de las evaluaciones

Tal como discutimos en la Sección 6.7 (Validación de las EVCC), se pueden validar los resultados de una EVCC estadísticamente o comparando los cambios proyectados en las especies con los observados in situ. Se considera que el enfoque más sólido actualmente disponible es la validación basada en observaciones, y se puede realizar a través de la obtención de información retrospectiva sobre las respuestas de la especie a eventos climáticos del pasado distante utilizando datos del paleo o evaluando las respuestas al cambio climático antropogénico que han tenido las especies hasta ahora. Lo último se ha realizado ampliamente a través de los enfoques correlativos y las observaciones de adherencia y no adherencia a los cambios proyectados han suministrado valiosas sugerencias (p.ej., Kharouba et al., 2009; Dobrowski et al., 2011; Fox et al., 2014), pero hasta la fecha, los enfoques basados en rasgos han sido pobremente validados y llenar este vacío es de gran prioridad actualmente. Realizar las EVCC de manera retroactiva (es decir, evaluando la capacidad de los modelos para predecir los cambios observados en las últimas décadas) también es una oportunidad interesante. En general, consideramos que la validación de las EVCC es la mayor prioridad de este campo ya que probar su desempeño predictivo es una base esencial para mejorar sus enfoques y métodos.

## 9.2 Mejores y más coordinados datos de biodiversidad

Mucha de la información necesaria para realizar y mejorar las EVCC se encuentra actualmente incompleta o no disponible (Butt et al., 2016). Se necesitan datos que describan las tolerancias fisiológicas de las especies (p.ej. los límites térmicos) y datos similares sobre las interacciones de las especies, los cuales están emergiendo como importantes motores de la vulnerabilidad al cambio climático para muchas especies. No obstante, en muchos casos lo que dificulta el monitoreo de la biodiversidad a escala global no es la insuficiencia de datos, sino la deficiente coordinación y disonancia entre las observaciones (Scholes et al., 2012; Joppa et al., 2016).

Es fundamental aumentar la cantidad, calidad y coordinación de los datos de biodiversidad por diferentes razones: primero, porque proporciona los datos necesarios para constatar la realidad en el

terreno de los resultados de las EVCC y de este modo, calibrar la fiabilidad de las proyecciones y mejorar la metodología. Segundo, porque permite la aplicación de las EVCC en regiones (p.ej., los trópicos) y grupos taxonómicos (p.ej., especies no carismáticas) evaluados de manera deficiente y por consiguiente, permite realizar reflexiones más representativas y realistas de las amenazas globales y regionales del cambio climático a la biodiversidad. Tercero, permite el desarrollo de preguntas que requieren la medición de las probabilidades de extinción y los cambios poblacionales, a través del uso de modelos mecanicistas. Por último, representa una base fundamental del monitoreo necesario para integrar, de manera efectiva, la adaptación al cambio climático en los planes y las acciones de conservación. El monitoreo es fundamental para establecer la precisión de las EVCC en la que se basa el plan de adaptación, para medir la efectividad y los impactos de las acciones de adaptación basadas en ella, y para la actualización iterativa de las EVCC y por consiguiente, de los planes y acciones. Los programas de ciencia ciudadana (p.ej., eBird, iNaturalist), por ejemplo, son un mecanismo que permite aumentar la disponibilidad de los datos de biodiversidad.

## 9.3 Avanzando la metodología de las EVCC

### 9.3.1 Métodos combinados o “híbridos” basados en las fortalezas de los diferentes enfoques

La combinación de los métodos EVCC permite potencialmente sacar provecho de las fortalezas de los tres enfoques básicos. En las Secciones 2.2.4 (Enfoques combinados), 4.1 (Pasos para seleccionar su enfoque y métodos para la EVCC) y en **Apéndice Tabla D** se proporcionan ejemplos de estas combinaciones, pero aún quedan muchos avances de EVCC por explorar a través de las combinaciones de nuevos enfoques y métodos.

### 9.3.2 Incluyendo los efectos de los cambios de frecuencia y magnitud de la variabilidad y los extremos climáticos

Los climas del futuro probablemente incluirán patrones de variabilidad y eventos extremos que afectarán en mucha mayor medida los sistemas ecológicos que solo cambios en las tendencias promedio (Thompson et al., 2013). Sin embargo, pese al papel fundamental que juegan la variabilidad y los extremos para determinar los patrones de la diversidad biológica, hasta la fecha, las comunidades ecológicas y de la conservación le han prestado muy poca atención a los impactos de los eventos catastróficos (Butt et al., 2016). Es difícil evaluar los eventos extremos dada

su rareza y por ende, pequeños tamaños muestrales. A pesar de ello, Ameca y Juárez et al. (2013) han realizado un análisis de los impactos que tienen los ciclones y las sequías en los mamíferos terrestres y Thompson et al. (2013) proponen un método para utilizar modelos climáticos que han sido reducidos de escala y que incorporan cambios proyectados en la variabilidad climática. Siguiendo a Butt et al. (2016), reconocemos el desafío que representa incorporar los extremos y la variabilidad climática en las evaluaciones de EVCC, pero recalamos que omitirlos resultaría en una comprensión incompleta de los impactos que tiene el cambio climático sobre las especies.

### 9.3.3 Incluyendo las interacciones entre las especies

Pocas veces se consideran las interacciones entre las especies explícitamente en las EVCC; sin embargo, con frecuencia son importantes impulsores de los impactos que tiene el cambio climático sobre las especies. Elaborar modelos sobre los nuevos conjuntos de comunidades del futuro proporcionaría información para las evaluaciones de vulnerabilidad ya que es poco probable que el clima sea el único determinante para la presencia de una especie en un área. Un importante vacío y desafío de la actualidad es la elaboración de modelos de las dinámicas futuras de los sistemas de depredadores y presas, huéspedes y parásitos y de polinización.

### 9.3.4 Incluyendo las respuestas humanas al cambio climático

Tal como discutimos en la Sección 5.2.1 (Los impactos directos versus los indirectos del cambio climático), la mayoría de los métodos actuales de EVCC ignoran los impactos que tienen las respuestas humanas al cambio climático sobre la biodiversidad, a pesar de que pueden igualar y hasta exceder los que surgen directamente de los cambios climáticos (Turner et al., 2010). Estas respuestas incluyen las respuestas directas de los humanos a los cambios climáticos (p.ej., cambiar los cultivos o usos del suelo) y sus respuestas secundarias (o indirectas), incluyendo la migración por escasez de agua o el aumento de los niveles del mar, así como las respuestas para mitigar o adaptarse al cambio climático (p.ej., la construcción de diques y rompeolas; el cultivo de biocombustibles; la implementación de los esquemas de reducción de emisiones asociadas a la deforestación y degradación forestal (REDD+, por sus siglas en inglés) (Watson, 2014; Segan et al., 2015). La falta de inclusión general de estas respuestas humanas y sus impactos potenciales sobre la biodiversidad representa una omisión seria de las evaluaciones actuales y su inclusión debe ser una prioridad para todos los enfoques y métodos de EVCC (Maxwell et al., 2015). Actualmente existen resúmenes útiles que describen los sustitutos y las proyecciones de muchas de esas respuestas humanas (p.ej., ver Maxwell et al. (2015)) y su desarrollo y uso en el contexto de las evaluaciones de la biodiversidad es muy necesario. Las EVCC que solo se centran en pequeñas escalas espaciales quizás deban incluir representantes de las comunidades locales para entender mejor las respuestas humanas probables al cambio climático.

### 9.3.5 Incluyendo las interacciones entre el cambio climático y otras amenazas

En relación con la consideración de las respuestas humanas, también se debe asegurar la inclusión de la interacción entre los elementos de estrés que generan cambios no climáticos (los que con frecuencia, pero no siempre, son causados directamente por el comportamiento humano) y el cambio climático (Segan et al., 2015). Aunque ya hay una crisis de extinción en desarrollo (Barnosky et al., 2011), pocas EVCC consideran de manera explícita las amenazas que la causan y la manera en que el cambio climático probablemente interactúe con ellas. Un área importante a investigar es explorar y entender estas interacciones y los impactos que tienen sobre la vulnerabilidad de las especies al cambio climático y sobre su extinción en general.

### 9.3.6 Considerando los cambios que ya ocurrieron en las especies debido al cambio climático

Las temperaturas medias ya han aumentado 0,75 °C globalmente y hasta 2 °C en algunos lugares (IPCC, 2013b; Wilgen et al., 2015). Esto ya ha tenido impactos considerables sobre las especies: en sus distribuciones, interacciones y comportamientos (Parmesan & Yohe, 2003; Devictor et al., 2012) y en la composición de las comunidades y los ecosistemas (Midgley & Bond, 2015; Pearce-Higgins et al., 2015). Sin embargo, las EVCC que asumen estabilidad actual, en vez de estados de referencia dinámicos, pueden producir resultados que no son relevantes para guiar acciones de conservación apropiadas en el presente (Butt et al., 2016). En el caso de los enfoques correlativos, utilizar las distribuciones actuales calibrar los modelos con respecto a los climas de referencia y por ende, de las especies con áreas de distribución conocidas o con probabilidad de cambiar; será cada vez menos exacto, debido a esto se deben utilizar los registros históricos. También es problemático utilizar los climas actuales como referencia, ya que las actuales poblaciones de las especies que poseen respuestas lentas o retrasadas (p.ej., especies longevas) probablemente ya se encuentren fuera de las áreas climáticamente adecuadas para su persistencia y en una trayectoria de descenso.

### 9.3.7 Mejorando los datos de rasgos y la selección de los umbrales de vulnerabilidad

Existen tres maneras importantes de mejorar los datos biológicos utilizados en los modelos basados en rasgos y mecanicistas. La primera es simplemente llenar los vacíos sobre los rasgos existentes de las especies. Foden et al. (2013), por ejemplo, encontraron que tales vacíos representaban, por mucho, la mayor fuente de incertidumbre en las EVCC globales basadas en rasgos de aves, anfibios y corales. La segunda es establecer empíricamente umbrales cuantitativos asociados con la vulnerabilidad de cada rasgo (p.ej., ¿cuánta especialización dietaria hace que una especie sea altamente sensible?; ¿cuánto cambio en la pluviosidad se considera excesivo para que una especie se pueda adaptar?). Tercero, muchos de los ‘rasgos’ utilizados en las evaluaciones basadas en rasgos o de enfoque combinado (p.ej., García et al., 2014) son en realidad

representaciones de los rasgos (proxies) en vez de rasgos en el sentido estricto de la palabra (Violle et al., 2007). Realizar estudios empíricos que determinen, por ejemplo, los límites fisiológicos de las especies, sus distancias máximas de dispersión y su plasticidad fenotípica permitiría utilizar características per se y mejorar así la solidez de los métodos basados en rasgos.

### 9.3.8 Incorporando cambios genéticos adaptativos y plasticidad fenotípica

Aunque sabemos que algunas especies pueden evolucionar y cambiar plásticamente en períodos considerablemente cortos, existe muy poca información relevante para las EVCC con respecto al potencial de adaptación de las especies al cambio climático (Catullo et al., 2015). La habilidad de la selección natural para “rescatar” poblaciones de los impactos negativos del cambio climático depende de la relación entre la tasa de evolución y la tasa del cambio climático. Cuando la presión de selección es fuerte, su costo demográfico (proporción de individuos que no sobreviven para reproducirse) puede ser muy alto para que las especies puedan tolerarlo, y por ende, se extinguen. Se necesita mucha investigación sobre los factores que establecen la tasa de evolución y si la diversidad genética existente es o no adecuada para respuestas adaptativas al cambio climático que anticipamos (Edwards, 2015). También se necesita desarrollar conocimiento sobre la arquitectura genética y cómo seleccionar conjuntos de rasgos podría mejorar o retrasar la selección de otros conjuntos (Etterson & Shaw, 2001). La selección también puede interactuar con la plasticidad fenotípica para mejorar o degradar las respuestas de las especies al cambio climático, pero se le debe dar más atención a esta interacción. Por ejemplo, la plasticidad fenotípica adaptativa puede permitirle a una especie “ganar” tiempo antes de que empiece a actuar lo que hubiera sido un cambio climático perjudicial. No obstante, mientras actúa la plasticidad fenotípica

ésta podría reducir la presión de selección, y por otro lado favorecer el establecimiento de un régimen selectivo riguroso con un alto costo de selección al alcanzar el cambio en el clima los límites de la plasticidad (Reed et al., 2011). Catullo et al. (2015) presentaron una agenda general de investigación para desarrollar una comprensión predictiva de la función de la evolución adaptativa en mediar las respuestas de las especies al cambio climático.

### 9.3.9 Aprovechando los avances en las aproximaciones –ómicas y secuenciación de próxima generación

Con el desarrollo de grandes cantidades de información sobre la genómica y transcriptómica de muchos grupos de organismos (Allendorf et al., 2010; Ellegren, 2014), incluyendo las especies amenazadas y sus parientes, cada vez más existe el potencial de utilizarla para contribuir con las EVCC. Ya es posible recolectar datos de ADN y ARN de los organismos y extraerlos de especímenes almacenados. La secuenciación parcial del genoma o transcriptoma para cubrir 1-10% del genoma, se puede realizar en forma relativamente barata, y se pueden utilizar para generar miles de marcadores de polimorfismos de nucleótidos únicos (SNP, por sus siglas en inglés) (Narum et al., 2013). Estos a su vez pueden ser utilizados para informar la historia pasada de las especies y su capacidad de adaptación futura probable. Los datos-ómicos pueden ayudar de diferentes maneras; entre otras, determinando el potencial para cambios adaptativos en diferentes poblaciones (Hoffmann et al., 2015; Christmas et al., 2016), la pertinencia de enfoques nuevos como la mezcla de los patrimonios genéticos y el rescate genético de especies amenazadas (Weeks et al., 2011), y los beneficios y desventajas de utilizar la hibridación (Hedrick & Fredrickson, 2010) como una forma de mejorar la capacidad de adaptación. Ver Cuadro 6.

#### Cuadro 6. El potencial de los enfoques –ómicos para el manejo de especies amenazadas

Existen muchas maneras para apoyar la toma de decisiones sobre la gestión de las especies amenazadas por el cambio climático a través de enfoques genómicos y transcriptómicos. La siguiente lista se basa en un marco de decisión desarrollado en una publicación reciente (Hoffmann et al., 2015) y comienza desde la evaluación inicial de riesgo hasta las intervenciones.

Pregunta		Acción potencial si la respuesta es Sí
1	¿Presentan todas las poblaciones diversidad genética lo suficientemente amplia como para tener una respuesta evolutiva?	Evaluar la variación tanto neutral como funcional a lo largo del genoma. Si la respuesta es NO, diríjase a la pregunta 2.
2a	Tienen algunas poblaciones mayor diversidad genética que otras?	Identificar los hotspots/refugios de diversidad genética en el terreno.
2b	¿Están algunas poblaciones adaptadas al clima local?	Identificar la selección pasada en loci relacionados con el clima. Si existe adaptación local (2b) y hotspots de diversidad (2a), diríjase a la pregunta 3.
3	¿Es el flujo genético lo suficientemente alto?	Complete picture of historical and current gene flow. If NO, go to 4.
4	¿Se pueden restaurar los patrones de flujo genético?	Comparar los patrones de flujo genético contemporáneos y pasados. Si la respuesta es NO, diríjase a la pregunta 5.
5	¿Es posible que haya una respuesta evolutiva positiva a través de la mezcla natural del patrimonio genético o la hibridación natural?	Identificar el potencial para la mezcla natural del patrimonio genético y la hibridación con marcadores moleculares de poblaciones/especies cercanas y los peligros (en caso de que la distancia genética es muy grande). Si la respuesta es NO, diríjase a la pregunta 6.
6	¿Es la hibridación forzada y la conservación ex situ posible?	Considerar un plan de hibridación forzada basada en datos genómicos y la conservación ex situ para mantener la diversidad genética a través de programas de reproducción.

## 9.4 Mejorar el intercambio de información entre la investigación en conservación y las comunidades que la practican

En nuestro objetivo común de conservar la biodiversidad, las comunidades de investigación en conservación y las que la practican, se ofrecen y reciben servicios mutuos. Los practicantes de la conservación normalmente destacan la necesidad de nuevas plataformas de investigación y proporcionan retroalimentación valiosa sobre la aplicación de la investigación. Por otro lado, los investigadores ayudan a desarrollar la metodología que apoya la toma de decisiones de los que practican la conservación. La mantención del intercambio de tales servicios en forma total y finalmente coordinada es esencial para la coproducción eficiente de fuentes de conocimiento. Algunas recomendaciones específicas para el intercambio focalizado entre estas comunidades son:

- Desarrollar y actualizar interfaces y herramientas de fácil uso para la elaboración de EVCC.
- Establecer asociaciones productivas entre los científicos y los gestores y realizar esfuerzos para reducir las brechas comunicacionales.
- Recolectar e informar las ‘lecciones aprendidas’ y recomendaciones tanto de los practicantes de la conservación como de los investigadores (de manera independiente o en conjunto) sobre las EVCC, su uso en la adaptación al cambio climático y en el monitoreo de la biodiversidad.
- Desarrollar una base de evidencias (p.ej. ConservationEvidence.com) con ejemplos sobre el uso de las EVCC para la adaptación al cambio climático. Esta debe incluir específicamente detalles de los problemas, las imprecisiones y las fallas, así como de sus causas.
- Desarrollar y actualizar directrices sobre las mejores prácticas para la planificación e implementación de planes de adaptación al cambio climático.

## 9.5 Mejorar el uso de la EVCC para apoyar la planificación de la conservación

Centrarse simplemente en que especies son más vulnerables es claramente útil para la elaboración de listas comparativas, pero sin la correcta contextualización, puede no ser útil para tomar acciones de conservación en el terreno (Butt et al., 2016). Algunos estudios han comenzado a investigar en la planificación y priorización usando EVCC, incluyendo la manera en que se usa esta información y el desarrollo de caminos para la toma de decisiones a fin de disminuir los impactos del cambio climático. Shoo et al. (2015), por ejemplo, suministraron un completo marco para la toma de decisiones asociadas a acciones de gestión específica del cambio climático. El marco de Adaptación para los Objetivos de Conservación (ACT, por sus siglas en inglés), desarrollado por Cross et al. (2012), presenta un proceso de dos fases, cuyo primer paso es identificar la característica de conservación y definir el objetivo de gestión. Al hacer esto, el marco ACT busca transformar las recomendaciones en acciones que estén específicamente vinculadas a las especies, hábitats o lugares (Cross et al., 2012). Este enfoque de establecer los objetivos de gestión al inicio del proceso permite que los gestores de conservación apliquen el marco a su objetivo específico y consideren otros componentes

importantes para la adaptación. Sin embargo, cuando tales enfoques de vulnerabilidad no están basados en objetivos, simplemente aumentan la lista de acciones en vez de ayudarnos a seleccionar entre ellas. Necesitamos tener claro el objetivo de la evaluación de vulnerabilidad y lo que necesitamos hacer en consecuencia y podemos lograrlo si diseñamos la evaluación con base en un objetivo (Game et al., 2013). Concretamente, los gestores pueden utilizar los componentes de vulnerabilidad en ejercicios de planificación de adaptación, identificando respuestas posibles que reduzcan la exposición, mejoren la capacidad de adaptación y hasta posiblemente reduzcan la sensibilidad (Stein et al., 2014).

## 9.6 Explorar la relación entre la EVCC de especies y sus implicaciones para las personas

El objetivo principal de la mayoría de las EVCC es entender los impactos potenciales que tiene el cambio climático sobre una especie y las implicaciones para su conservación; por ejemplo, al mejorar la planificación para la conservación (consulte la Sección 3 (Estableciendo las metas y objetivos de la evaluación de vulnerabilidad al cambio climático)). Sin embargo, particularmente para las especies que tienen un uso práctico directo, la planificación debe incluir la interacción entre los impactos del cambio climático sobre una especie y la explotación continua de las personas para tratar de asegurar que tal explotación sea sostenible. Los ejemplos incluyen las EVCC de plantas medicinales, madera utilizada como combustible y árboles maderables, los peces de agua dulce y las especies cazadas para su consumo en la zona de Albertine Rift (Carr et al., 2013). Abordar estas conexiones en la etapa de la EVCC puede ayudar a visualizar una potencial crisis incipiente de un medio de subsistencia (p.ej., el potencial colapso de una pesquería) y generar un argumento crucial para desarrollar una gestión de conservación efectiva de esa especie.

Más ampliamente, en los casos en los que una especie particular representa una especie ‘clave’ o ‘ingeniera’, la elaboración de una EVCC es un primer paso para comprender cómo los impactos sufridos por estas especies podrían propagarse a todo el ecosistema del que forman parte. El aumento o disminución de la abundancia, colonización local o extinción de una especie a causa del clima puede tener repercusiones importantes en la función del ecosistema y por ende, en los servicios que éste proporciona a las personas. Aunque tales consideraciones probablemente no representen un gran problema para muchas especies y la mayoría de las EVCC, estas evaluaciones serán cada vez más importantes a medida que avanza el cambio climático y aumentan los esfuerzos para ayudar a las personas a adaptarse al cambio climático y a reducir el riesgo climático con la ayuda de los servicios de la biodiversidad y los ecosistemas (denominada adaptación basada en los ecosistemas (EbA, por sus siglas en inglés) (Andrade et al., 2011; Jones et al., 2012)).



# 10. Estudios de caso

**Tabla 12. Lista de estudios de caso y los enfoques, ecosistemas, escalas espaciales y escenarios de recursos que cubren.**

Abreviaturas: EVCC, evaluación de vulnerabilidad a cambios climáticos; AP, área protegida; AVP, análisis de viabilidad de la población; MDE, modelo de distribución de especies; EVRB, evaluación de vulnerabilidad basada en rasgos biológicos.

Casos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Enfoque del EVCC	Correlativo	Correlativo	Correlativo para especies de distribución reducida	Mecanicista	EVRB	EVRB	Combinado Correlativo - EVRB	Combinado Correlativo - Mecanicista (complejo)	Combinado Correlativo - EVRB	Combinado (todos)
Referencia y área temática	(Reside et al., 2012) Cambio en el estado de amenaza, aves de la sabana tropical australiana	(Hole et al., 2011) Reemplazo de aves en áreas protegidas africanas	(Platts et al., 2014a) Anfibios en África; enfoque en nichos multidimensionales donde MDE son inviábiles; se puede añadir rasgos biológicos	(Lacy et al., en preparación) Modelado de metapoblaciones/ AVP de osos polares en Svalbard (no espacial)	(Butler et al., 2014) Peces de agua dulce en América del Norte	(Foden et al., 2013) Sección de corales de la UICN, EVCC global	(Baker et al., 2015) Modelos correlativos que incluyen parámetros de dispersión; para la planificación de APs	(Fordham et al., 2013) Lince ibérico; Combina metapoblaciones, hábitat, interacciones interespecíficas y clima	(García et al., 2014) Rasgos muestran dónde los MDE pueden subestimar o sobrestimar el riesgo	(Thomas et al., 2011) Método de evaluación que incluye EVRB, enfoques correlativos y mecanicistas
Asuntos abordados	Resultados aplicados a la Lista Roja	Para la planificación de APs y para el uso de los gerentes de APs	Especies de distribución reducida	Polar; enfoque detallado en una sola especie	Especies de agua dulce; incluye amenazas indirectas	Temperatura del mar; acidificación del océano	Enfoque en una sola especie; para la planificación de APs	Enfoque detallado en una sola especie; interacciones interespecíficas; simulación de intervenciones de conservación	Usa resultados de MDEs y EVRBs	Se puede adaptar a múltiples métodos
Ecosistema	Terrestre	Terrestre	Agua dulce, Terrestre	Marino, Polar	Agua dulce	Marino	Terrestre	Terrestre	Terrestre	Terrestre
Enfoque taxonómico	Aves	Aves	Anfibios	Mamíferos	Peces	Corales	Aves, mamíferos, anfibios	Mamíferos	Anfibios	Mariposas, escarabajo
Alcance taxonómico	Muchas especies	Muchas especies	Una o varias especies	Una especie	Muchas especies	Muchas especies	Muchas especies	Una especie	Muchas especies	Muchas especies
Escala espacial	Paisaje (Australia)	Paisaje y/o localidad (áreas protegidas africanas)	Regional (África subsahariana)	Paisaje Marino/ Terrestre (Svalbard)	Local (subnacional)	Paisaje marino (global)	Paisaje (África Occidental)	Paisaje	Paisaje	Sitio/Paisaje (Gran Bretaña)
Requerimientos de datos	Alto	Medio	Medio/Bajo	Alto	Medio/Bajo	Medio/Bajo	Alto/Medio	Muy alto	Medio	Medio/Mixto

Los chorlitos dorados (*Pluvialis apricaria*) son vulnerables al aumento de la frecuencia de las sequías en verano debido al cambio climático, ya que esto causa la disminución de la abundancia de los tipúlidos que se alimentan en turberas y son su principal fuente de alimentación. Sin embargo, se ha demostrado que bloquear los canales de drenaje y las cárcavas aumentan los niveles del agua y por ende, ayuda a aumentar las poblaciones de tipúlidos. Chorlito dorado © Nigel Clark / BTO. Tipúlido ©James Pearce-Higgins/BTO. Zanja de drenaje ©James Pearce-Higgins/BTO



**Tabla 13. Clave para seleccionar estudios de casos adecuados a sus objetivos de EVCC.**

Relevancia de los casos de estudio: rojo - alta; naranja - media; amarillo - baja; blanco - muy baja

Objetivos del EVCC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Enfoque taxonómico</b>										
<b>Enfoque de una sola especie:</b>										
a) Factores de vulnerabilidad al cambio climático										
b) Interacciones interespecíficas										
c) Dinámicas de metapoblaciones										
d) Resultados restringidos espacialmente										
<b>Enfoque multi-especie:</b>										
a) Vulnerabilidad relativa de las especies										
b) Proyección de cambios de distribución, identificación de refugios climáticos y rutas migratorias										
<b>Enfoque en la localidad o red de localidades</b>										
a) Identificación de las especies más vulnerables										
b) Proyección de cambios de distribución y sustitución de especies, identificación de refugios climáticos y rutas migratorias										
c) Persistencia local de especies bandera										
<b>Casos especiales</b>										
a) Evaluación de la vulnerabilidad de una sola especie con distribución restringida										
b) Evaluación de la vulnerabilidad de una sola especie con distribución restringida										

## Referencias

- Baker; D. J., A. J. Hartley, N. D. Burgess, S. H. M. Butchart, J. A. Carr, R. J. Smith, E. Belle, and S. G. Willis. 2015. Assessing climate change impacts for vertebrate fauna across the West African protected area network using regionally appropriate climate projections. *Diversity and Distributions* **21**:991–1003.
- Butler; P., K. Barrett, R. Cooper, H. Galbraith, K. Hall, H. Hamilton, J. O'Leary, L. Sneddon, and B. E. Young. 2014. Alternatives for Climate Change Vulnerability Assessment: Report to the Appalachian Landscape Conservation Cooperative. Arlington, Virginia.
- Foden; W. B., S. H. M. Butchart, S. N. Stuart, J.-C. Vié, H. R. Akçakaya, A. Angulo, L. M. DeVantier, A. Gutsche, E. Turak, L. Cao, S. D. Donner, V. Katariya, R. Bernard, R. A. Holland, A. F. Hughes, S. E. O'Hanlon, S. T. Garnett, Ç. H. Şekercioglu, and G. M. Mace. 2013. Identifying the World's Most Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians and Corals. *PLoS One* **8**:e65427.
- Fordham; D. A., H. R. Akçakaya, B. W. Brook, A. Rodríguez, P. C. Alves, E. Civantos, M. Triviño, M. J. Watts, and M. B. Araújo. 2013. Adapted conservation measures are required to save the Iberian lynx in a changing climate. *Nature Climate Change* **3**:899–903.
- García; R. A., M. B. Araújo, N. D. Burgess, W. B. Foden, A. Gutsche, C. Rahbek, and M. Cabeza. 2014. Matching species traits to projected threats and opportunities from climate change. *Journal of Biogeography* **41**:724–735.
- Hole; D. G., B. Huntley, J. Arinaitwe, S. H. M. Butchart, Y. C. Collingham, L. D. C. Fishpool, D. J. Pain, and S. G. Willis. 2011. Toward a management framework for networks of protected areas in the face of climate change. *Conservation Biology: the journal of the Society for Conservation Biology* **25**:305–15.
- Platts; P. J., R. A. Garcia, C. Hof, W. Foden, L. A. Hansen, C. Rahbek, and N. D. Burgess. 2014. Conservation implications of omitting narrow-ranging taxa from species distribution models, now and in the future. *Diversity and Distributions* **20**:1307–1320.
- Reside; A. E., J. VanDerWal, and A. S. Kutt. 2012. Projected changes in distributions of Australian tropical savanna birds under climate change using three dispersal scenarios. *Ecology and Evolution* **2**:705–718.
- Thomas; C. D., J. K. Hill, B. J. Anderson, S. Bailey, C. M. Beale, R. B. Bradbury, C. R. Bulman, H. Q. P. Crick, F. Eigenbrod, H. M. Griffiths, W. E. Kunin, T. H. Oliver, C. A. Walmsley, K. Watts, N. T. Worsfold, and T. Yardley. 2011. A framework for assessing threats and benefits to species responding to climate change. *Methods in Ecology and Evolution* **2**:125–142.

## Estudio de caso 1. Un enfoque correlativo para las aves australianas de la sabana tropical

Realizado por: April Reside  
Basado en: Reside et al., 2012

### 1. Objetivos generales

En el área este tropical de Australia se han realizado trabajos de investigación sobre el impacto que probablemente tendrá el cambio climático en la fauna de la selva tropical. Sin embargo, no se han realizado estudios sobre los hábitats que comprenden la gran mayoría de la geografía tropical australiana: las sabanas tropicales. Este estudio es un inicio para llenar este vacío enfocándose en las aves de la sabana tropical, ya que representaban el grupo taxonómico mejor analizado y en consecuencia, del que se tenía los datos más completos.

Resumen de los objetivos de la EVCC	
Objetivos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Investigar el impacto del cambio climático en la cantidad y ubicación de áreas con clima adecuado para las especies.</li> <li>2. Investigar el impacto de diferentes escenarios de dispersión en las proyecciones futuras de las distribuciones de las especies.</li> <li>3. Calcular el cambio en la abundancia de especies desde la fecha de referencia hasta el 2080 utilizando proyecciones de los modelos de distribución de las especies y escenarios de dispersión realistas.</li> </ol>
Foco taxonómico	Aves
Foco geográfico	Sabanas tropicales australianas
Marco temporal	Desde la fecha de referencia (1990) hasta 2080

### 2. Contexto

Las sabanas tropicales comprenden casi un cuarto del continente australiano, extendiéndose desde la costa este hasta las costas del oeste y norte del continente. Las sabanas tropicales se caracterizan por presentar una pluviosidad anual de alta variabilidad, a la que se han adaptado las especies existentes a través de una baja especificidad dietética o presentando alta movilidad, por lo que son capaces de rastrear los recursos cambiantes. En general, se considera que la biota de sabana es resistente al cambio ambiental debido a su extensión y a sus condiciones altamente variables; sin embargo, dado que se ha acumulado evidencia de la disminución de muchas especies de mamíferos y aves en esta región, los organismos de conservación han comenzado a cuestionar esta idea. Se necesitaba realizar investigaciones adicionales para entender cómo probablemente impactaría el cambio climático a las especies de sabana y se necesitaba entender cómo las especies que se encontraban en regiones biogeográficas clave de las sabanas podrían ser también afectadas por el cambio climático a fin de centrar la atención de los profesionales de la conservación.

La organización líder de investigación del gobierno federal australiano, la Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth (CSIRO, por sus siglas en inglés), y la Universidad James Cook financiaron un proyecto para: 1) desarrollar métodos de elaboración de modelos de la distribución de las especies apropiados para ser utilizados en especies de alta vagilidad en un ambiente de gran variabilidad ambiental, y 2) elaborar modelos de la distribución de estas especies en diferentes escenarios de cambio climático.

### 3. Justificación del enfoque y los métodos

Seleccionamos un enfoque correlativo para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático. Primero, elaboramos un modelo de distribución de cada una de las especies bajo diferentes escenarios de cambio climático e investigamos las proyecciones resultantes de espacio climático adecuado y cómo variaban al utilizar diferentes escenarios de dispersión. En un segundo paso, aún no publicado, combinamos estos modelos correlativos con un enfoque basado en rasgos biológicos/ecológicos de las especies a fin de obtener un análisis comparativo completo de la vulnerabilidad al cambio climático.

Suitability of methods				
	Correlativo	Basado en rasgos	Mecanístico	Combinado
¿Cumple los objetivos?	Yes	Yes	Possibly	Yes
¿Existen recursos disponibles?	Yes	Yes	No	Yes
¿Se seleccionó?	<b>Yes</b>	Yes (separate study)	No	For a follow-up assessment

Seleccionamos Maxent (Phillips et al., 2006) para elaborar el modelo correlativo, ya que los colaboradores participaron en la evaluación de métodos de modelización de distribución de las especies, en la que consideraron que Maxent fue uno de los algoritmos de mejor rendimiento (Elith et al., 2006). Se nos permitió utilizar el Clúster Informático de Alto rendimiento de la Universidad James Cook, en donde elaboramos modelos paralelos para cientos de especies y escenarios futuros múltiples en relativamente poco tiempo. Los modelos se elaboraron para 243 especies de aves, tres escenarios de emisiones (SRES A2, A1B y B1) (Nakicenovic et al., 2000), 30 Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) (Cubash et al., 2001) y divisiones temporales cada 10 años (\*No estoy seguro que se refiera a eso\*); obteniendo 218.700 modelos individuales, los cuales requirieron aproximadamente 13 años de procesamiento en paralelo.

### 4. Aplicación de los métodos

Se eligieron las aves como grupo focal del estudio ya que la mayoría de los datos de la biota de la sabana pertenecen a este grupo, y por la evidencia de la disminución de algunos de los grupos funcionales de las aves en esta región. Asimismo, existían

datos disponibles para aplicar el enfoque basado en rasgos para la mayoría de las especies de aves de Queensland, por lo que se examinaron las especies para las que se contaba con datos adecuados. La fuente principal de datos de incidencia fue BirdLife Australia, la cual ahora ha compartido los datos con Atlas of Living Australia. Se recolectaron los datos de la capacidad de dispersión de las especies en la literatura científica y en los datos recolectados por el equipo de investigación de la biodiversidad de sabana de CSIRO. Se requirió de muchos meses de trabajo para revisar los datos de incidencia de las especies y para los registros erróneos. Los datos climáticos se obtuvieron del Proyecto Australiano de Disponibilidad de Agua (Grant et al., 2008, Jones et al., 2007) y se crearon las capas climáticas utilizando el paquete “climas” de R (VanDerWal et al., 2011a). Se realizó el procesamiento posterior a la elaboración de los modelos utilizando el paquete de herramientas “SDMTools” de R (VanDerWal et al., 2011b). A pesar de tener acceso al Clúster Informático de Alto rendimiento de la Universidad James Cook para realizar este trabajo, representó un desafío procesar los grandes conjuntos de datos de entrada y los muchos modelos resultantes. El apoyo del Profesor Jeremy VanDerWal, de la Universidad James Cook en la elaboración de los modelos fue fundamental para el éxito del proyecto.

Uno de los desafíos más importantes fue establecer cómo presentar y crear una historia coherente utilizando los >200.000 modelos. Luego de varias iteraciones, se decidió solo presentar los resultados del escenario modelado con emisiones moderadamente severas (SRES A1B) ya que esto permitía una narrativa más coherente de los resultados bajo un escenario de rango medio. Consideramos que la decisión se justifica porque los resultados de varios escenarios de emisión no influenciaron la dirección ni la expresión espacial del cambio. Solo varió el tiempo requerido para obtener un resultado específico.

En el documento se presentó una proyección media de las especies para cada periodo del A1B. Se convirtieron estas distribuciones proyectadas en resultados binarios de ‘adecuada’/‘no adecuada’ utilizando un valor umbral de Maxent, y se sintetizaron para proporcionar un cálculo de la abundancia de especies en cada periodo. Se realizó esto en cada uno de los diferentes escenarios de dispersión para poder comparar los resultados.

Como resultado, se obtuvo un modelo de distribución para cada combinación de: especie, escenario de emisión, GCM y periodo, y se generaron proyecciones medias para cada especie, periodo y escenario de emisión. Luego se incorporaron los resultados en un análisis con base en los rasgos que aún se encuentra en revisión.

Examinamos cómo afectaría el cambio climático a las especies con migración o estrategias de movimiento diferentes. Comparamos la cantidad de espacio climático futuro proyectado que permanecerá adecuado para las especies migratorias, nómadas, parcialmente migratorias, sedentarias o para las especies con poblaciones nómadas y sedentarias. Muchas de las especies incluidas en nuestro estudio también existen ampliamente en otras regiones fuera de la sabana; p.ej., algunas existen en la costa mélica este y otras en las regiones de sabana y áridas. Comparamos la cantidad de espacio climático adecuado proyectado al futuro entre especies

con diferentes afinidades biogeográficas. Finalmente, evaluamos la cantidad de espacio climático que se proyecta que permanezca adecuado para especies incluidas en listas internacionales de conservación como especies amenazadas.

## 5. Resumen de los resultados

Se proyectó que las especies migratorias y aquellas limitadas a los ambientes tropicales serían las que menos perderían espacio climático adecuado para el año 2080. De hecho, se predijo que aumentaría considerablemente el espacio climático adecuado para algunas de las especies limitadas a entornos tropicales para el año 2080 (Reside et al., 2012b). Esto se debe en gran medida por las proyecciones de aumento de la pluviosidad en el centro del área de la sabana tropical. Probablemente se cumplan estas proyecciones en un futuro, dado que se han observado mejoras en las condiciones de las aves de sabana en esta área debido al aumento de las precipitaciones que se han registrado durante los últimos 60 años (VanDerWal et al., 2013). Sin embargo, también se proyectó que las especies tropicales de la Península de Cape York serían las que perderían la mayor cantidad de espacio climático adecuado. Estas especies son particularmente vulnerables probablemente debido a sus distribuciones restringidas (especialmente comparadas con otras especies) y a los cambios en los regímenes de incendios de las décadas recientes (Reside et al., 2012a).

Este estudio concluyó que el escenario de dispersión utilizado para calcular la cantidad de espacio climático adecuado del futuro puede cambiar dramáticamente los resultados de las proyecciones para las especies. Particularmente, si se comparan los extremos de dispersión ilimitada (es decir, una especie capaz de distribuirse en la medida necesaria para encontrar un clima adecuado) y de no dispersión (es decir, las especies no podrán ocupar el espacio climático adecuado en el futuro si se superpone a las áreas adecuadas actuales) se obtienen historias completamente diferentes: desde aumentos considerables hasta disminuciones drásticas de las áreas de distribución de las especies. Ningún escenario es preciso ya que muchas especies ya se encuentran más limitadas que el grupo de climas modelados y existe amplia evidencia de la dispersión de aves fuera de su rango histórico en años recientes. Es importante ajustar los escenarios de dispersión a las capacidades de dispersión individuales de las especies a fin de obtener proyecciones más precisas de los impactos del cambio climático.

## 6. Resultados para la conservación

Se informaron los resultados a través de la publicación del documento de investigación en una revista científica (Reside et al., 2012) y su presentación en diferentes conferencias y seminarios, incluyendo seminarios previos a la culminación de postgrados, seminarios de laboratorio en el Instituto Durrell de Ecología de Conservación de la Universidad de Kent en el Reino Unido, y en la Universidad “La Sapienza” en Roma, y las conferencias anuales de la Sociedad Ecológica de Australia. Quizás los resultados de este estudio tuvieron poca respuesta; sin embargo, los métodos de elaboración de sus modelos fueron aplicados posteriormente en un estudio de seguimiento de 2000 especies de vertebrados en Australia (Reside et al., 2013), cuyos resultados han sido utilizados y aceptados ampliamente. Los principales agentes interesados en estos resultados incluyen los gobiernos estatales de Australia, los



grupos de Manejo de Recursos Naturales y otros investigadores. Los resultados de estos estudios han sido utilizados en planes de adaptación al cambio climático de grupos de Manejo de Recursos Naturales y en la adquisición de terrenos del Sistema Nacional de Reserva.

## 7. Posibles mejoras

Este y los estudios subsiguientes (Reside et al., 2013) podrían mejorarse evaluando el impacto de utilizar el algoritmo de elaboración de modelo elegido (Maxent) sobre los resultados obtenidos. Además, se necesita información sobre la sensibilidad al cambio y la capacidad de adaptación de las especies por separado para comprender completamente cómo responderán al cambio climático. Se ha trabajado para incorporar estos factores en la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de las aves de sabana y ya se encuentra en revisión para su publicación (Reside et al., en revisión). Al inicio de este trabajo existían pocos marcos de referencia disponibles para aplicar algún enfoque con base en rasgos biológicos. Como resultado, fue sumamente difícil convencer a los evaluadores de la validez de los enfoques combinados correlativos-con base en rasgos para evaluar la vulnerabilidad de las especies al cambio climático. Es por esto que aún se encuentra en revisión el estudio de enfoque combinado que ha estado en desarrollo durante al menos cinco años. Para darle continuidad a este estudio o comenzar otros similares, se recomienda ampliamente utilizar enfoques combinados y basados en rasgos publicados previamente.

Otra mejora podría ser poner a disposición más resultados disponibles a través de los materiales complementarios que se encuentran en línea. Se pueden encontrar los modelos actuales y las proyecciones futuras de todos los vertebrados de Australia en línea, a través de una interfaz de fácil uso.

## 8. Referencias

- Cubash, U. et al. 2001. Projections of future climate change. In: Houghton, J. T. et al. (eds), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, pp. 525–582.
- Elith, J. et al. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* **29**: 129–151.
- Grant, I. et al. 2008. Meteorological and remotely sensed datasets for hydrological modelling: a contribution to the Australian Water Availability Project. pp. 1–4.
- Jones, D. A. et al. 2007. Climate Data for the Australian Water Availability Project: Final Milestone Report. National Climate Centre, Australian Bureau of Meteorology.
- Nakicenovic, N. et al. 2000. Emissions Scenarios. In: Nakicenovic, N. and Swart, R. (eds), *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, p 570.
- Phillips, S. J. et al. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* **190**: 231–259.
- Reside, A. E. et al. 2012a. Fire regime shifts affect bird species distributions. *Diversity and Distributions* **18**: 213–225.
- Reside, A. E. et al. 2012b. Projected changes in distributions of Australian tropical savanna birds under climate change using three dispersal scenarios. *Ecology and Evolution* **2**: 705–718.
- Reside, A. E. et al. In review. Assessing vulnerability to climate change: a comprehensive examination of Australian tropical savanna birds.
- Reside, A. E. et al. 2013. Climate change refugia for terrestrial biodiversity: defining areas that promote species persistence and ecosystem resilience in the face of global climate change. National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast, p 216.
- VanDerWal, J. et al. 2011a. Package 'climates': methods for working with weather and climate.
- VanDerWal, J. et al. 2011b. SDMTTools: Species Distribution Modelling Tools: Tools for processing data associated with species distribution modelling exercises. In: 1.1-5/r90, R. p. v. (ed), <http://R-Forge.R-project.org/projects/sdmttools/>.
- VanDerWal, J. et al. 2013. Focus on poleward shifts in species' distribution underestimates the fingerprint of climate change. *Nature Climate Change* **3**: 239–243.

## Estudio de caso 2. Desarrollo de un marco para identificar estrategias de adaptación al cambio climático para la Red de Áreas Importantes para Aves Africanas

Realizado por: Dave Hole y Stephen Willis  
Basado en: Hole et al., 2011

### 1. Objetivos generales/resumen ejecutivo

Las redes de áreas de importancia para la conservación de la diversidad biológica son pilares de las estrategias actuales de conservación, pero son fijas en espacio y tiempo. A medida que avanza el cambio climático, los cambios en las áreas de distribución de las especies pueden transformar la comunidad ecológica de un sitio determinado. Por consiguiente, puede ser que en el futuro no se protejan algunas de las especies de una red existente o solo se protegerían si se trasladan a otros lugares que tengan las condiciones apropiadas. En este estudio desarrollamos un enfoque metodológico para determinar estrategias adecuadas de adaptación al cambio climático en lugares específicos de una red, basados en las proyecciones de cambios futuros en las proporciones de especies emigrantes (especies para las que el lugar se vuelve climáticamente inadecuado), colonizadoras (especies para las que el lugar se vuelve climáticamente adecuado) y persistentes (especies que pueden permanecer en el lugar a pesar del cambio climático). Nuestro enfoque también identifica regiones clave para aumentar la efectividad futura de la red. A través del uso de la red de Áreas Importantes para las Aves (IBA, por sus siglas en inglés) de África subsahariana como estudio de caso, encontramos que las estrategias de conservación apropiadas para lugares específicos varían considerablemente en esta región, y que los sitios nuevos que son clave para aumentar la resistencia de la red varían en espacio y tiempo. A pesar de que estos resultados destacan las dificultades potenciales de cualquier marco de planificación que busque abordar las necesidades de adaptación al cambio climático, también demuestran que tales marcos son necesarios si se adoptan estrategias de conservación efectivamente en la actualidad, y factibles, si se aplican juiciosamente.

Resumen de los objetivos de la CCVA	
Objetivos	Determinar estrategias de adaptación al cambio climático para lugares específicos de acuerdo a las proyecciones futuras de cambios en las distribuciones de especies. Identificar sitios clave con los que la red podría mejorar su efectividad futura.
Foco taxonómico	Aves
Foco geográfico	África subsahariana
Marco temporal	Desde el presente (2010) hasta mediados (2050) y finales del siglo (2080)

Adecuación de los métodos				
	Correlativo	Basado en rasgos	Mecánico	Combinado
¿Cumple con los objetivos?	Sí	No	Sí	Sí
¿Existen recursos disponibles?	Sí	No	No	No
¿Se seleccionó?	Sí	No	No	No

## 2. Contexto

La red de Áreas Importantes para las Aves (IBA) de BirdLife (actualmente denominada Red de Áreas Importantes para las Aves y la Biodiversidad) en África subsahariana representa la red más grande sistemáticamente identificada de sitios (803 en total) en el continente que son importantes globalmente para la persistencia de la biodiversidad. Al igual que para cualquier red de gran escala de sitios importantes para la biodiversidad, el cambio climático puede tener repercusiones negativas considerables para su efectividad a largo plazo con respecto a la preservación de las especies para las que la red estaba diseñada a proteger, ya que las mismas siguen (o intentan seguir) sus nichos climáticos cambiantes. Se abordaron los impactos potenciales del cambio climático en un estudio previo (Hole et al., 2009) comisionado por la Sociedad Real para la Protección de Aves (RSPB, por sus siglas en inglés). Posteriormente, se realizaron estudios de seguimiento para determinar estrategias de adaptación amplias para lugares específicos de la red, basados en los cambios proyectados en la idoneidad climática de cada IBA para las 815 especies identificadas en ellas. También se recomendaron sitios adicionales para la red que podrían aumentar su efectividad ante el cambio climático. La Universidad de Durham (Reino Unido), una institución líder en la evaluación de los impactos del cambio climático en la biodiversidad, realizó el trabajo en colaboración con BirdLife International y RSPB.

## 3. Justificación del enfoque y los métodos

Se seleccionaron los métodos correlativos debido al gran alcance taxonómico y geográfico de este estudio de caso (815 especies de África subsahariana). Las limitaciones de datos de la mayoría de estas especies impidió el uso de modelos mecanísticos, mientras que las evaluaciones basadas en rasgos biológicos/ecológicos habrían sido inadecuadas para proporcionar el componente espacial necesario para entender la heterogeneidad de la idoneidad climática de los IBA por separado. Afortunadamente, hubo disponibilidad de datos de ubicación de todas las especies de interés, a través de la Universidad de Copenhague, con suficiente resolución espacial (a pesar de no ser la ideal), lo que facilitó aún más la selección del enfoque correlativo.

Se seleccionaron los modelos de Superficie de Respuesta Climática (CRS, por sus siglas en inglés) debido a su utilidad, demostrada previamente, en la elaboración de modelos sobre los impactos climáticos proyectados para las aves (Huntley et al., 2006). También se aplicaron los Modelos Aditivos Generalizados (GAM, por sus siglas en inglés) para evaluar la incertidumbre resultante de la metodología de elaboración de modelos.

Nuestra principal necesidad para cumplir las metas de este estudio de caso fue lograr comprender cómo las especies prioritarias de aves cambiarían su representación (es decir, si desaparecerían, colonizarían o persistirían) en las IBA individuales de la red completa de la IBA de África subsahariana debido al cambio climático. Los modelos correlativos, pese a sus límites reconocidos (p.ej., Pacifici et al., 2015) nos proporcionan una metodología que nos permite proyectar la presencia/ausencia de un gran número de especies en IBA individuales en el tiempo. Como consecuencia, nuestro marco resultante para describir las estrategias de adaptación al cambio climático para todos los lugares de la red basado en este amplio grupo de especies (consulte a continuación), fue más sólido con respecto al sesgo que resulta de algunos modelos ajustados deficientemente que si lo hubiésemos basado en un grupo de proyecciones específicas de las especies para IBA individuales.

## 4. Aplicación de los métodos

Evaluamos todas (815) las especies prioritarias (es decir, aquellas que generaban designación de IBA) en África subsahariana, porque los cambios de sus distribuciones y su representación en las IBA son lo que podrían afectar más la eficacia futura de la red ante el cambio climático. Incluyen todas las especies globalmente amenazadas y con área de distribución y bioma restringidos (excluimos un pequeño número de especies gregarias que también generan designación de IBA).

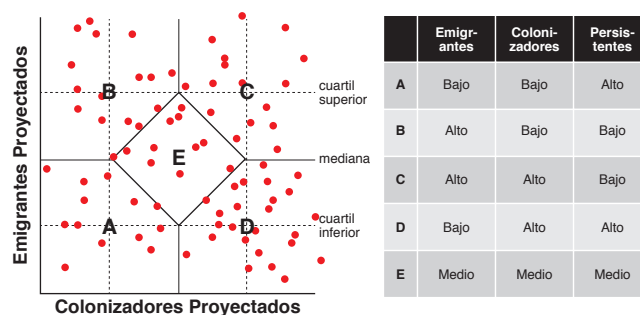
Los datos para la elaboración de los modelos de todas las 815 especies fueron obtenidos a través del Museo Zoológico de la Universidad de Copenhague a resolución de un grado. Este fue el grupo de datos más confiable y completo disponible en el momento. Los datos climáticos 'actuales' fueron extraídos de Worldclim (<http://www.worldclim.org>) con resolución de 2,5' y agregados a 1°. Los datos climáticos futuros fueron obtenidos del archivo de datos (Tercer Informe de Evaluación) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Se necesitaron recursos de computación importantes para reducir y combinar los datos climáticos actuales con las anomalías futuras (considere que estos análisis se realizaron en

el 2007). Excepcionalmente, pudimos validar nuestro enfoque de modelización comparando los inventarios de especies de IBA modelados con la composición de especies de un subconjunto de IBA para las que se tenían listados actualizados de especies ('inventarios observados'). A pesar de que los datos observados eran fundamentales para validar el modelo aplicado, fue un desafío obtenerlos, siendo posible sólo a través de los importantes contactos de BirdLife International con organizaciones locales.

Se desarrollaron modelos para cada una de las 815 especies utilizando datos de localidad y cuatro variables bioclimáticas (seleccionadas por su utilidad, demostrada previamente, para elaborar modelos climáticos de las distribuciones de aves; Huntley et al., 2006) de toda la región africana subsahariana. Posteriormente, se proyectó el modelo de cada especie al clima característico de cada IBA en el presente y para tres proyecciones climáticas futuras (derivadas de tres Modelos de Circulación General separados en el rango de variabilidad en proyecciones futuras de la precipitación (Hole et al., 2009)) y dos horizontes temporales (centrados en 2055 y 2085). A continuación, se utilizaron probabilidades de presencia modeladas actuales y futuras para generar 'inventarios esperados' de las especies para cada IBA en cada tiempo; los inventarios modelados del presente fueron comparados con los 'inventarios observados' en nuestro subconjunto de IBA, con el fin de conocer la confiabilidad de los modelos para poder avanzar. Se utilizaron modelos de 15 especies, para cada IBA, tanto en el presente como en los periodos futuros, a fin de calcular las proporciones de especies colonizadoras, emigrantes y persistentes. Finalmente, se definieron estrategias de adaptación al cambio climático para cada sitio de la red de acuerdo a las proporciones relativas de cada uno de estos tres grupos de especies dentro de cada IBA. Finalmente, utilizamos los modelos generados para las 815 especies para sitios adicionales a la red que podrían facilitar los cambios en las distribuciones y completar los vacíos identificando: i) las regiones que nuestros modelos sugerían que serían las más importantes en el futuro para las especies prioritarias con menos apoyo en la red existente; ii) las regiones a las que se trasladarían el mayor número de especies prioritarias; y iii) las regiones menos cubiertas por la red existente (basados en la distancia existente entre cada cuadrícula de 0,25° en África subsahariana y la IBA más cercana).

## 5. Resumen de los resultados

El marco que resume las proyecciones de los modelos de todas las 815 especies para asignar estrategias de adaptación de alto nivel para lugares específicos es bastante simple. Calculamos las proporciones medias de las especies prioritarias proyectadas emigrantes y colonizadoras para cada IBA y periodo como los valores medios para las tres proyecciones futuras. Posteriormente graficamos el conjunto de proporciones promedio de emigrantes proyectados contra el conjunto de proporciones promedio de colonizadores proyectados para cada IBA. Utilizamos los valores medios, del cuartil inferior y del cuartil superior de cada eje para dividir el área del gráfico resultante en cinco sectores (Figura EC 2.1).



**Figura EC 2.1** Distribución de las IBA (puntos rojos) en cinco categorías de acuerdo a sus respectivas proporciones de especies emigrantes, colonizadoras y persistentes (tomado de Hole et al., (2011)).

Finalmente, clasificamos cada IBA en una de cinco categorías de acuerdo al sector del gráfico en donde se establecieron: alta persistencia, especialización en aumento, alta rotación, valores en aumento, y diversificación en aumento. Luego utilizamos la naturaleza de los cambios proyectados en las proporciones de especies prioritarias emigrantes, colonizadoras y persistentes de cada categoría para identificar los principios generales de la CCAS más apropiada para las IBA de esa categoría, reconociendo la contribución de cada categoría para lograr los objetivos de toda la red. Inferimos los cambios en la proporción de especies persistentes a partir de la de emigrantes (si la proporción de emigrantes era alta, por definición, la proporción de especies persistentes sería baja y viceversa). También determinamos la relevancia específica de las categorías para la probable adopción de acciones de gestión que promuevan la resistencia (efectos de protección y proteger recursos muy valorados), resiliencia (mejorar la capacidad para regresar a las condiciones deseadas después de una alteración) o facilitación (favorecer la transición de las condiciones actuales a las nuevas). Finalmente, determinamos la naturaleza e importancia relativa, para cada categoría, de cinco acciones clave de gestión (tomado de Heller & Zavaleta, (2009), Mawdsley et al., (2009), Millar et al., (2007) y Galatowitsch et al., (2009)) con el objetivo de mejorar la capacidad de adaptación de la especie prioritaria a un lugar: restauración y creación del hábitat; gestión de régimen de alteración; translocación; aumento de la extensión del lugar y gestión matricial.

Adicionalmente, combinamos nuestros tres indicadores sobre los lugares adicionales que podrían añadir resiliencia futura a la red en un solo índice de 'valor añadido' y los incluimos en un mapa de África subsahariana.

Los lugares de las categorías de persistencia y alta rotación fueron dos veces más comunes que los de las otras tres categorías. Se observaron patrones geográficos consistentes en la distribución de las categorías de los lugares: la categoría de alta persistencia predominó particularmente en la región de Guinea-Congo y la mayoría de África occidental, mientras que la categoría de alta rotación predominó en la zona sur de África tropical (desde Namibia y Angola hasta Mozambique y Tanzania). En otros lugares, por ejemplo, al noreste de África (Etiopía, Somalia, Kenia y Uganda) y al sur de África, no predominó ninguna categoría.

Se encontraron más valores en aumento de IBA principalmente en las márgenes del Sahara (Níger, Chad, y Sudán) y al suroeste árido (principalmente en Namibia). Se encontraron IBA más pequeñas muy diseminadas en esta categoría. Con respecto a los lugares óptimos para sitios adicionales, estos se encontraron principalmente en Gabón, Congo, Namibia, Botsuana, Suráfrica del este, sur de Mozambique y desde Tanzania hasta el norte del área de Albertine Rift hasta Etiopía y Somalia.

## 6. Resultados para la conservación

Se divulgaron los resultados a través de literatura revisada por pares, su presentación en conferencias internacionales y en reuniones con BirdLife Partnership, y el sitio web extranet de Partnership. A medida que los socios de BirdLife (particularmente para los países en desarrollo) avancen en el desarrollo e implementación de estrategias para la adaptación del cambio climático, se recomienda utilizar el enfoque de Hole et al., (2011) porque es el único que proporciona guías para la implementación de acciones de adaptación informadas a través de los impactos proyectados a escala de sitios específicos.

## 7. Posibles mejoras

Se pudo haber mejorado la robustez de los resultados utilizando datos de distribución de especies de resolución más fina y datos climáticos interpolados a través de un modelo mecánico (es decir, utilizando un modelo climático regional en lugar de una interpolación estadística simple como se utilizó aquí). Sin embargo, tales datos no se encontraban disponibles al momento de la realización del estudio y aún no se encuentran disponibles a escala panafricana.

Más ampliamente, existe la necesidad de integrar mejor las propuestas de financiamiento y la planificación de proyectos, los recursos financieros y las actividades necesarias para transferir el contenido de los documentos científicos publicados en la guía de adaptación cuidadosamente dirigida a los destinatarios pertinentes (p.ej., manejadores de los sitios), así como para smaterial de divulgación.

## 8. Referencias

- Galatowitsch, S., L. Frelich, and L. Phillips-Mao. 2009. Regional climate change adaptation strategies for biodiversity conservation in a midcontinental region of North America. *Biological Conservation* 142:2012–2022.
- Heller, N. E., and E. S. Zavaleta. 2009. Biodiversity management in the face of climate change: A review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* 142:14–32.
- Hole, D. G., B. Huntley, J. Arinaitwe, S. H. M. Butchart, Y. C. Collingham, L. D. C. Fishpool, D. J. Pain, and S. G. Willis. 2011. Toward a management framework for networks of protected areas in the face of climate change. *Conservation Biology: the Journal of the Society for Conservation Biology* 25:305–15.
- Hole, D. G., S. G. Willis, D. J. Pain, L. D. Fishpool, S. H. M. Butchart, Y. C. Collingham, C. Rahbek, and B. Huntley. 2009. Projected impacts of climate change on a continent-wide protected area network. *Ecology Letters* 12:420–31.
- Huntley, B., Y. C. Collingham, R. E. Green, G. M. Hilton, C. Rahbek, and S. G. Willis. 2006a. Potential impacts of climatic change upon geographical distributons of birds. *Ibis* 148:8–28.

- Huntley, B., Y. C. Collingham, R. E. Green, G. M. Hilton, C. Rahbek, and S. G. Willis. 2006b. Potential impacts of climatic change upon geographical distributions of birds. *Ibis* 148:8–28.
- Mawdsley, J. R., R. O'Malley, and D. S. Ojima. 2009. A review of climate-change adaptation strategies for wildlife management and biodiversity conservation. *Conservation Biology* 23:1080–1089.
- Millar, C. I., N. L. Stephenson, and S. L. Stephens. 2007. Climate change and forest of the future: Managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications* 17:2145–2151.
- Pacifici, M., W. B. Foden, P. Visconti, J. E. M. Watson, S. H. M. Butchart, K. M. Kovacs, B. R. Scheffers, D. G. Hole, T. G. Martin, H. R. Akçakaya, R. T. Corlett, B. Huntley, D. Bickford, J. A. Carr, A. A. Hoffmann, G. F. Midgley, P.-K. P., R. G. Pearson, S. E. Williams, S. G. Willis, B. Young, and C. Rondinini. 2015. Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change* 5:215–225.

## Estudio de caso 3. De vuelta a los principios con los anfibios africanos

Realizado por: Philip J. Platts y Raquel A. Garcia  
Basado en: Platts et al., 2014a

### 1. Objetivos generales

Un desafío particular para las EVCC que emplean técnicas correlativas como los modelos de distribución de especies (SDM, por sus siglas en inglés) es que no se pueden realizar modelos climáticos de las especies que no tienen suficientes registros de incidencia. Dependiendo de la escala de análisis, esto puede significar dejar a un lado muchas especies de distribución restringida, que normalmente son las que representan mayor preocupación para su conservación (Schwartz et al., 2006, Platts et al., 2014a).

¿Importa esta omisión de las especies de distribución restringida al evaluar los patrones espaciales de vulnerabilidad a un nivel taxonómico superior? Si alguna de las siguientes hipótesis es correcta, entonces probablemente la respuesta es afirmativa: (1) las especies omitidas del SDM correlativo tienen, en promedio, diferentes nichos climáticos que las especies elegibles para la elaboración del modelo; (2) se espera que tanto las especies omitidas como las especies elegibles experimenten diferentes anomalías climáticas en el futuro.

Resumen de los objetivos de la EVCC	
Objetivos	Probar las hipótesis sobre los esquemas de prioridad de conservación de gran escala. Evaluar la tendencia? espacial de los resultados de la EVCC.
Foco taxonómico	Anfibios
Foco geográfico	Sur del Sahara de África continental
Marco de tiempo	Desde finales del siglo XX hasta finales del siglo XXI

### 2. Contexto

Los modelos correlativos que proyectan las distribuciones de las especies ante el cambio climático se aplican frecuentemente en la literatura científica y son ampliamente citados por los planificadores de conservación que buscan determinar si las prioridades existentes permanecerán válidas en los climas futuros. Estos modelos deben



ser respaldados por datos suficientes sobre la distribución de las especies a fin de evitar predicciones falsas (Stockwell y Peterson 2002); un prerequisite que, casi por definición, no cumplen muchas de las especies de alta preocupación para la conservación, particularmente para las bajas resoluciones espaciales de los datos de especies y climas que comúnmente se encuentran disponibles a escala continental.

Esto aplica particularmente en los trópicos donde las especies suelen tener distribuciones más restringidas que en latitudes más altas (Wiens *et al.*, 2006), y hasta las distribuciones de especies comunes tienden a ser menos documentadas (Feeley y Silman 2011). Estos desafíos de datos se encuentran ejemplificados en África subsahariana donde la información sobre las especies es, a lo sumo, irregular y confundida por las imprecisiones espaciales de los registros históricos.

Ante estos obstáculos, vale la pena considerar cómo la omisión de especies de distribución restringida (o con muestras insuficientes) de herramientas conocidas de SDM podría sesgar los resultados de la EVCC. Se eligieron los anfibios como estudio de caso por los altos niveles de amenaza que enfrentan por el cambio climático, la pérdida de hábitat y enfermedades (Sodhi *et al.*, 2008, Hof *et al.*, 2011). Los anfibios africanos son principalmente endémicos del continente, lo que hace que el modelo sea más manipulable.

### 3. Justificación del enfoque y los métodos

De las tres opciones principales para la realización de EVCC, los enfoques correlativos son por mucho los más utilizados. Los métodos mecanísticos pocas veces se pueden utilizar debido a los grandes grupos de especies poco estudiadas. Las evaluaciones basadas en rasgos biológicos/ecológicos son una alternativa viable (Foden *et al.*, 2013) y podrían combinarse con los enfoques correlativos (García *et al.*, 2014, Willis *et al.*, 2015). Sin embargo, el objetivo de este trabajo fue determinar las implicaciones de restringir la EVCC a técnicas correlativas.

Para probar las hipótesis de que las especies omitidas de los SDM ocupan diferentes nichos climáticos y/o enfrentan diferentes exposiciones al cambio climático fue suficiente realizar una clasificación multivariada de los puntos de distribución de las especies. Sin embargo, es claramente difícil inferir la vulnerabilidad o prioridad futura de las especies omitidas en el procedimiento de elaboración del modelo climático en cuestión. A fin de evitar esta trampa-22 (N. del T.: término que se refiere a situación paradójica de la que el individuo no se puede escapar debido a reglas contradictorias) fue necesario redefinir el SDM con respecto a su interpretación básica (Busby 1991) y luego, modificar el procedimiento de tal manera que se pudiese incluir en el análisis cualquier especie, sin importar el tamaño de su área de distribución (consultar a continuación).

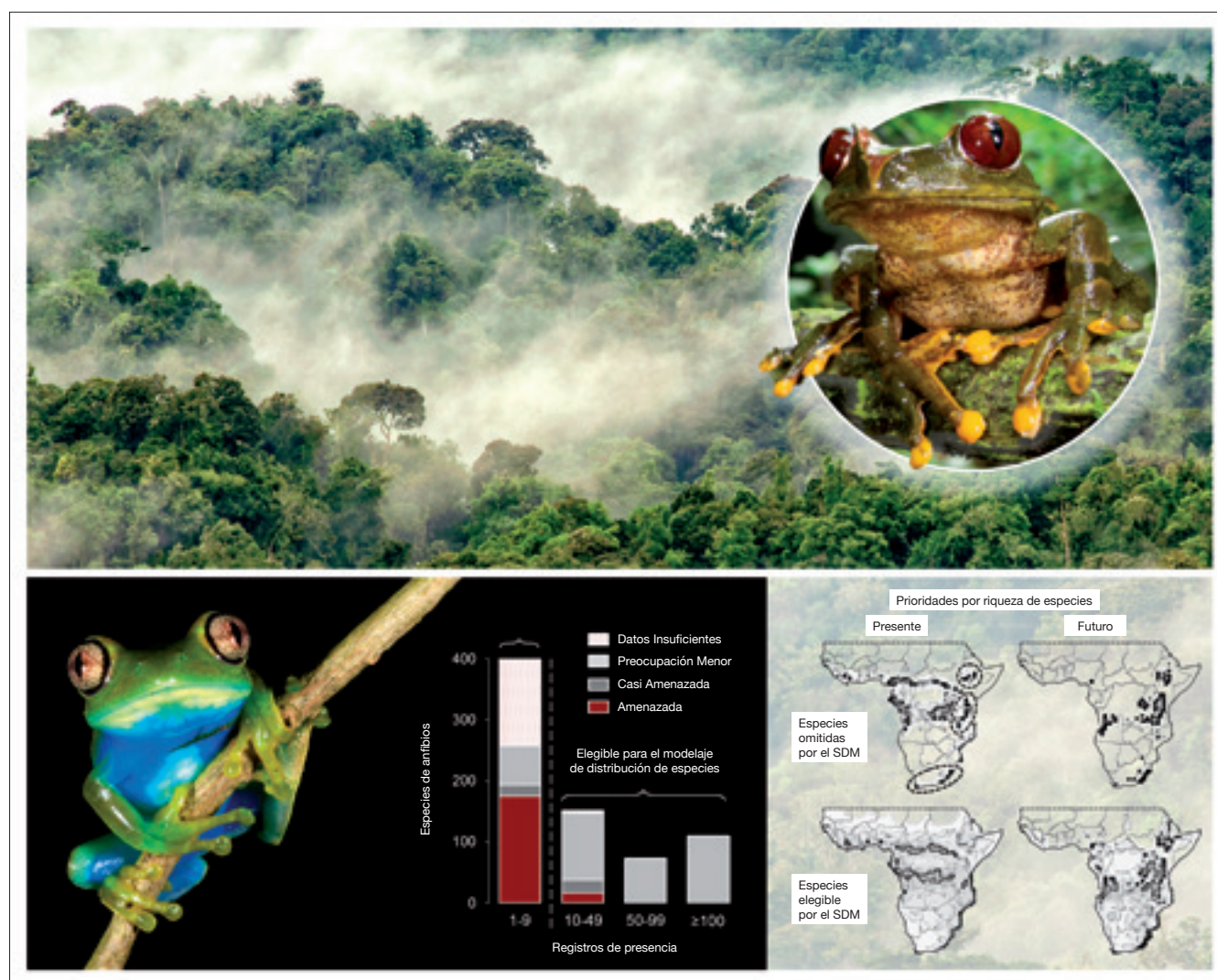
Adecuación de los métodos				
	Correlativo	Basado en rasgos	Mecánico	Combinado
¿Cumple los objetivos?	Sí	No	No	No
¿Existen recursos disponibles?	Sí	Sí	No	No
¿Se seleccionó?	Sí	No	No	No

### 4. Aplicación de los métodos

Se recolectaron datos de distribución de 790 especies de anfibios que solo se encuentran al sur del Sahara de África continental (Hansen *et al.*, 2007; actualizados hasta febrero de 2014). Al combinarlos con la taxonomía de UICN ([www.iucnredlist.org](http://www.iucnredlist.org)) el número de especies se redujo a 733. Los datos son confiables a una resolución de 1° (111 km en el ecuador). Cada anfibio se consideró elegible u omitido del SDM correlativo de acuerdo a un corte de diez registros (los umbrales de otros estudios varían de cinco a 50 registros). Se utilizó la clasificación multivariada (Índice medio periférico, OMI, por sus siglas en inglés; Dolédec *et al.* 2000) para probar las diferencias en las distribuciones observadas entre las especies elegibles versus las especies omitidas con respecto (1) al espacio del nicho climático y (2) a la exposición proyectada al cambio (anomalías climáticas).

Se resumió el clima en cuatro variables débilmente colineales (Pearson's  $|r| < 0.7$ ): temperatura media y rango de temperatura anual, precipitación media y periodicidad de la pluviosidad. Las condiciones de referencia (1950-2000) se tomaron de WorldClim (Hijmans *et al.*, 2005), utilizando valores medios para rasterizarlos de 30" a resolución de 1°. Las condiciones futuras (2071-2100) se tomaron de AFRICLIM: CMIP5 GCM reescalados regionalmente, corrigiendo el sesgo en comparación con las referencias de WorldClim (Platts *et al.*, 2015). Se consideraron dos rutas de emisiones de IPCC-AR5: RCP4.5 y RCP8.5. Se computaron las anomalías futuras para las variables de temperaturas restando los valores futuros a los presentes; se obtuvieron las anomalías de las variables de pluviosidad a través del radio del futuro al presente.

Se proyectaron todas las distribuciones de los anfibios en espacio y tiempo utilizando las envolturas climáticas del nicho multidimensional (MDNE, por sus siglas en inglés). A diferencia de los métodos modernos de SDM, esta técnica simple clasifica todas las condiciones dentro del rango climático observado de una especie como viable uniformemente y las otras condiciones como completamente inadecuadas. Es por esto que, para incluir hasta a los anfibios con un solo registro de incidencia, se utilizó el rango intercuartílico de las condiciones climáticas locales (30") dentro de la(s) cuadrícula(s) de 1° para definir las envolturas. Se limitaron las predicciones futuras a un escenario de no dispersión (se espera que las velocidades del cambio climático en resolución de 1° sobrepasen las capacidades de dispersión de la mayoría de los anfibios africanos).



**Figura EC 10.1** Para muchos anfibios de África subsahariana (y para otros grupos de especies), los datos de presencia son muy escasos o espacialmente agrupados para la elaboración de modelos climáticos precisos de la distribución de las especies. Esto es particularmente problemático para las especies amenazadas. El sesgo resultante para las especies de distribución restringida afecta los cálculos modelados de abundancia, rareza y carácter irremplazable en las condiciones actuales y bajo el cambio climático. Recuadro: rana arborícola del bosque de Parker (*Leptopelis parkeri*), en peligro según la Lista Roja de UICN. Abajo, a la izquierda: rana arborícola del bosque de Barbour (*Leptopelis barbouri*), Vulnerable. Fondo: franja de humedad de los bosques de montaña en el Parque Nacional de Nyungwe, Ruanda. Fotografía de Michele Menegon ([www.michelemenegon.it](http://www.michelemenegon.it)). Composición tomada de la portada de Diversity and Distributions, Vol. 20, Número 11.

## 5. Resumen de los resultados

De las 733 especies de anfibios, 400 tienen muy pocos registros para los SDM correlativos, incluyendo 92% de ellas amenazadas con extinción (VU/EN/CR en la Lista Roja de UICN). Las especies omitidas del SDM ocupan un espacio de nicho considerablemente diferente al de las especies elegibles: sus distribuciones observadas se caracterizan por mayor pluviosidad anual con menor periodicidad de pluviosidad, temperaturas más frías y menos estacionales y topografía más compleja. Esto se ajusta a literatura más amplia sobre la tendencia a mayor escala de áreas diversas/diferentes desde el punto de vista climático y topográfico de contener una abundancia desproporcionada de especies de rango limitado (Ohlemuller *et al.*, 2008).

Se obtuvieron las medidas de prioridad derivadas empíricamente (p.ej., las 100 celdas principales de abundancia de especies) para cada conjunto de especies (elegibles u omitidas) y periodo (presente o futuro), apilando las distribuciones de especies incluidas en el modelo. Se compararon estas medidas con los tres esquemas de prioridad de conservación de gran escala: los “hotspots” de biodiversidad de Conservation International (Mittermeier *et al.*, 2004), las áreas endémicas de aves de BirdLife International (Stattersfield *et al.*, 1998) y las ecoregiones Global 200 de World Wildlife Fund (Olson y Dinerstein 1998).

En general, se obtuvo mayor congruencia en las medidas de prioridad empírica y en los esquemas existentes de los conjuntos de especies omitidas que en los de las especies elegibles; sin embargo, esto variaba dependiendo de la región y la medida

consideradas. Al proyectar las medidas empíricas al clima futuro, se redujo la congruencia con los esquemas existentes en África occidental mientras que generalmente aumentó al este y al sur de África. En general, se proyectó que las prioridades de las especies elegibles cambiarían hacia los esquemas existentes (y por ende, hacia las especies omitidas), debido a la mayor estabilidad climática de estos lugares. Del mismo modo, mientras que con frecuencia las especies omitidas perdieron todo el espacio climático de resolución de 1°, las poblaciones persistentes tendieron a coincidir con los esquemas de prioridad existentes. Estos resultados se resumen en la Figura CS3.1.

## 6. Resultados para la conservación

En el clima actual, los umbrales de requerimientos de datos de incidencia de las especies impuestos por el SDM sistemáticamente minimizan los lugares importantes para especies de distribución restringida y amenazadas. Este problema abarca todos los grupos taxonómicos y se mitiga parcialmente a través de la elaboración de modelos climáticos a escalas más finas. En climas futuros, la persistencia entre las especies de distribución restringida y amplia (dependiendo de los procesos de escalas más finas) es mayor dentro de los sitios ya identificados para la inversión en conservación, por lo que se debe mantener el enfoque en estos sitios.

Se divulgaron los resultados de este estudio a través de un artículo de una revista especializada (Platts *et al.*, 2014) y la cobertura de medios asociados (p.ej., <http://www.unep-wcmc.org/news/near-extinct-african-amphibians-invisible-under-climate-change>) facilitados por fotografías de fauna a fin de promover la participación de una audiencia más amplia ([www.michelemenegon.it/](http://www.michelemenegon.it/)).

## 7. Posibles mejoras

Los modelos de envolturas climáticas ‘para regresar a los principios’ que se utilizaron en este trabajo, a pesar de ser útiles para demostrar los resultados potencialmente contrastantes del modelo para comparar especies de distribución restringida con las de distribución amplia, no deben de ser considerados como suficientes para abordar el problema de especies raras. En vez de eso, se debe desarrollar un rango más amplio de enfoques que incluya procedimientos basados en rasgos biológicos/ecológicos, mecanísticos y correlativos (y combinaciones de éstos) y deben de ser utilizados en las EVCC para poder representar adecuadamente la vulnerabilidad de las especies de distribución restringida en los planes de conservación.

## 8. Referencias

- Busby, J. R. 1991. BIOCLIM – a bioclimatic analysis and prediction system. Pages 64–68 in C. R. Margules and M. P. Austin, editors. *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*. CSIRO, East Melbourne, Australia.
- Dolédéc, S., D. Chesse, and C. Gimaret-Carpentier. 2000. Niche separation in community analysis: a new method. *Ecology* **81**:2914–2927.
- Feeley, K. J. and M. R. Silman. 2011. The data void in modeling current and future distributions of tropical species. *Global Change Biology* **17**:626–630.
- Foden, W. B., S. H. M. Butchart, S. N. Stuart, J.-C. Vié, H. R. Akçakaya, A. Angulo, L. M. DeVantier, A. Gutsche, E. Turak, L. Cao, S. D. Donner, V. Katariya, R. Bernard, R. A. Holland, A. F. Hughes, S. E. O’Hanlon, S. T. Garnett, Ç. H. Şekerciöglü, and G. M. Mace. 2013. Identifying the World’s Most Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians and Corals. *PLoS One* **8**:e65427.
- García, R. A., M. B. Araújo, N. D. Burgess, W. B. Foden, A. Gutsche, C. Rahbek, and M. Cabeza. 2014. Matching species traits to projected threats and opportunities from climate change. *Journal of Biogeography* **41**:724–735.
- Hansen, L.A., Burgess, N.D., Fjeldsø, J., Rahbek, C. 2007. *One degree resolution databases of the distribution of 739 amphibians in sub-Saharan Africa* (version 1.0). Zoological Museum, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones, and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**:1965–1978.
- Hof, C., M. B. Araújo, W. Jetz, and C. Rahbek. 2011. Additive threats from pathogens, climate and land-use change for global amphibian diversity. *Nature* **480**:516–519.
- Mittermeier, R. A., P. R. Gil, M. Hoffmann, J. Pilgrim, T. Brooks, C. G. Mittermeier, J. Lamoreux, and G. A. B. da Fonseca. 2004. *Hotspots Revisited: Earth’s Biologically Richest and Most Endangered Ecoregions*. CEMEX, Mexico City, Mexico.
- Ohlemüller, R., B. J. Anderson, S. H. M. Butchart, M. B. Arau, O. Kudrna, R. S. Ridgely, and C. D. Thomas. 2008. The coincidence of climatic and species rarity : high risk to small-range species from climate change. *Biology Letters* **4**:568–572.
- Olson, D. M., and E. Dinerstein. 1998. The Global 200: a representation approach to conserving the Earth’s most biologically valuable ecoregions. *Conservation Biology* **12**:502–515.
- Platts, P. J., R. A. García, C. Hof, W. Foden, L. A. Hansen, C. Rahbek, and N. D. Burgess. 2014. Conservation implications of omitting narrow-ranging taxa from species distribution models, now and in the future. *Diversity and Distributions* **20**:1307–1320.
- Platts, P. J., P. A. Omeny, and R. Marchant. 2015. AFRICLIM: high-resolution climate projections for ecological applications in Africa. *African Journal of Ecology* **53**:103–108.
- Schwartz, M. W., L. R. Iverson, A. M. Prasad, S. N. Matthews, R. J. O’Connor, and O’Connor R. J. 2006. Predicting extinctions as a result of climate change. *Ecology* **87**:1611–5.
- Sodhi, N. S., D. Bickford, A. C. Diesmos, T. M. Lee, L. P. Koh, B. W. Brook, C. H. Sekercioglu, and C. J. a Bradshaw. 2008. Measuring the meltdown: drivers of global amphibian extinction and decline. *PLoS One* **3**:e1636.
- Stattersfield, A., Crosby, M. J., Long, A. J. and Wege, D. C. 1998. *Endemic Bird Areas of the world: priorities for biodiversity conservation*. BirdLife International, Cambridge, UK.
- Stockwell, D. R. B., and A. T. Peterson. 2002. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecological Modelling* **148**:1–13.
- Wiens, J. J., C. H. Graham, D. S. Moen, S. a Smith, and T. W. Reeder. 2006. Evolutionary and ecological causes of the latitudinal diversity gradient in hylid frogs: treefrog trees unearth the roots of high tropical diversity. *The American Naturalist* **168**:579–96.
- Willis, S. G., W. Foden, D. J. Baker, E. Belle, N. D. Burgess, J. Carr, N. Doswald, R. A. García, A. Hartley, C. Hof, T. Newbold, C. Rahbek, R. J. Smith, P. Visconti, B. E. Young, and S. H. M. Butchart. 2015. Integrating climate change vulnerability assessments from species distribution models and trait-based approaches. *Biological Conservation* **190**:167–178.





Izquierda: Presidente del Grupo de Especialistas de Pinnípedos y miembro del GE de Cambio Climático, Dr. Kit M. Kovacs, con una cría de foca anillada © Kit M Kovacs. Derecha: Las focas anilladas (*Pusa hispida*) dependen completamente de los hábitats marinos helados para dar a luz, descansar, mudar la piel y buscar presas. La disminución del hielo oceánico debido al calentamiento climático tendrá efectos negativos en el rango de esta especie. © Kit M. Kovacs y Christian Lydersen, NPI

## Estudio de caso 4. Explorando los impactos de la reducción del hielo oceánico sobre los osos polares y sus presas, la foca anillada y la foca barbuda, al norte del Mar de Barents

Realizado por: Robert C. Lacy, Kit M. Kovacs, Christian Lydersen y Jon Aars

### 1. Objetivos generales

**El cambio climático es una gran amenaza para los osos polares** y otras especies árticas y se espera que ocurra la extirpación (extinción local de las poblaciones) en buena parte de sus áreas de distribución en las próximas décadas. Los principales efectos de las reducciones del hielo oceánico debido al calentamiento global del Ártico sobre los osos se producen por la disminución de la disponibilidad de las focas que dependen del hielo, que son sus principales presas. Tanto las focas como los osos son también importantes para las poblaciones humanas costeras que se encuentran en gran parte del Ártico. Todas las focas dependientes del hielo se reproducen solo en hielo oceánico, por lo que la disponibilidad de este hábitat particular se relaciona directamente con su posibilidad de reproducción y la continuación de su existencia; así como la capacidad de

supervivencia de los osos, a su vez, se encuentra vinculada a la de las focas. Este estudio de caso es una nueva exploración de los impactos del calentamiento climático sobre la trayectoria de las poblaciones del oso polar y de dos de sus presas clave, las focas anilladas y las focas barbudas, al norte del Mar de Barents. La región es un “hotspot” ártico que está experimentando un acelerado calentamiento. Aplicamos modelos de Análisis de Viabilidad Poblacional (PVA, por sus siglas en inglés) relacionados para explorar las trayectorias poblacionales de estas tres especies en 100 años a fin de informar a las autoridades de la gestión ambiental y a los conservacionistas sobre las tasas esperadas de disminución regional de esta especie.

Resumen de los objetivos de la EVCC	
Objetivos	Proyectar los impactos al clima que afectan las relaciones entre los depredadores y sus presas. Entender cuándo ocurrirán los cambios climáticos críticos que requieren las especies focales. Predecir cuándo el cambio climático reducirá las poblaciones a niveles críticamente bajos.
Foco taxonómico	Oso polar, foca anillada, foca barbuda
Foco geográfico	Norte del Mar Barents
Marco temporal	Desde el presente (2010) hasta 2100



## 2. Contexto

Este estudio se realizó debido a las preocupaciones existentes con respecto a los impactos que está teniendo la disminución de las condiciones del hielo oceánico en el Ártico sobre los mamíferos marinos dependientes del mismo (Laidre et al., 2008, 2015; Kovacs et al., 2011). Limitamos el alcance de este estudio al norte del Mar de Barents por la relativa abundancia de datos que se encuentran en el área de las especies en cuestión y porque es un “hotspot” de cambio ambiental debido al calentamiento climático. Además, es una región que no tiene comunidades indígenas dependiente de los recursos marinos. De este modo se pueden tomar decisiones de gestión sin que surjan problemas derivados de la caza de subsistencia. Se seleccionaron los osos polares como especie focal de este estudio (p.ej., Hunter et al., 2010; Molnár et al., 2010) por ser depredadores importantes que tienen una fuerte influencia sobre los niveles tróficos inferiores y por ser un asunto de gestión particularmente sensible. Las osas polares madres requieren de abundantes presas, de alta energía y de fácil acceso desde el hielo firme (hielo que hace contacto con la costa) a fin de alimentar a sus cachorros cuando emergen de las guaridas en primavera, luego de muchos meses de ayuno. Esto crea una dependencia crítica de la población de focas anilladas que tienen a sus crías en guaridas (pequeñas cuevas de nieve) en hielo firme. Las focas anilladas y barbudas adultas son presas importantes para los osos polares durante todo el año. Dada la complejidad de este sistema y la importancia de estos mamíferos marinos para sus ecosistemas, el Instituto Polar Noruego y el Grupo de Especialistas en Cría para la Conservación patrocinaron la colaboración de sus científicos para realizar este trabajo.

## 3. Justificación del enfoque

Nuestro objetivo era examinar cómo los impactos del cambio climático afectaban las relaciones de especies altamente dependientes. La mayoría de los enfoques de EVCC se centran en una sola especie bajo la hipótesis de que todas las otras especies con las que interactúan son estáticas o pueden ser representadas como simples tendencias en los recursos (presas) o amenazas (depredadores, competidores o enfermedades). Sin embargo, si existen relaciones estrechas entre las especies, incluyendo interacciones entre ellas, entonces se necesitan modelos que proyecten cada especie y sus interacciones simultáneamente para poder probar los efectos del cambio climático en el sistema o cualquier alteración importante sobre las especies o sus interacciones. Elegimos el enfoque de metamodelo para vincular los PVA, de tal forma que cada una informara a la(s) otra(s) sobre los cambios en la dinámica de sus especies focales y elaborar modelos explícitos de las relaciones funcionales que vinculan a las especies. Se ha utilizado recientemente el enfoque de relacionar los PVA para explorar cómo los cambios ambientales pueden afectar las dependencias de las especies a fin de evaluar las amenazas por enfermedades (Shoemaker et al., 2014), cambio de cobertura original de terreno a sistemas agrícolas (Prowse et al., 2013) y especies invasoras (Miller et al., 2016). En el presente trabajo aplicamos esta metodología para estudiar la alteración de las dependencias entre las especies causada por el cambio climático.

Adecuación de los métodos				
	Correlativo	Basado en rasgos	Mecánico	Combinado
¿Cumple los objetivos?	No	No	Sí	No
¿Existen recursos disponibles?	Sí	Sí	Sí	Sí
¿Se seleccionó?	No	No	Sí	No

En el caso de especies longevas pueden existir desfases considerables entre la disminución de las condiciones ambientales que satisfacen las necesidades de hábitat de una especie y la respuesta reflejada en el tamaño poblacional, especialmente cuando los mecanismos involucran interacciones entre las especies. Por consiguiente, los enfoques correlativos que suponen que las distribuciones de las especies se encuentran en equilibrio hubiesen podido haber revelado consecuencias a largo plazo (en siglos), pero no a la velocidad con la que se observarían los impactos del cambio climático sobre la fauna. Los enfoques basados en rasgos biológicos/ecológicos tampoco habrían capturado las interacciones entre las especies, las cuales son clave para inferir lo que le podría suceder a los principales depredadores en ecosistemas particulares.

## 4. Aplicación de los métodos

A fin de establecer PVA para las tres especies, nos basamos en información demográfica y ecológica publicada y en la experiencia de los investigadores del Instituto Polar Noruego. Existen datos considerables sobre la demografía y el comportamiento predatorio de los osos polares sobre el tamaño de su población en el Mar de Barents, en donde utiliza dos archipiélagos como guarida (Tierra de Svalbard y Frans Josef). Los datos sobre las focas son menos detallados que los de los osos polares, pero se conocen sus historias básicas de vida. Existen algunos datos disponibles sobre el tamaño poblacional y los datos demográficos de la reproducción de focas en Svalbard, pero no se han calculado previamente las poblaciones más grandes del Mar de Barents ni la extensión del intercambio entre las áreas (p.ej., entre las focas que utilizan el hielo firme y las que usan el hielo compacto más hacia el norte).

Para representar las interacciones de las especies en el metamodelo, utilizamos patrones generales de requerimientos energéticos de los mamíferos y alguna información específica sobre la distribución de las presas y las clases de tamaño tomadas por los depredadores. Muchos de estos cálculos son solo aproximados (con incertidumbre no cuantificable) por lo que se realizaron pruebas de sensibilidad, variando los parámetros del modelo en rangos supuestamente posibles para tener una idea de la robustez de los resultados.

Resultó particularmente difícil obtener cálculos de los aspectos climáticos clave que afectan las interacciones entre los osos polares y las focas, como las tendencias en la extensión del hielo firme en los fiordos en abril y la cantidad de nieve acumulada en ese hielo, los cuales son determinantes para la supervivencia de las crías de las focas anilladas. Esto a su vez influye en la habilidad de los osos polares para criar a sus cachorros con implicaciones obvias a largo

plazo para las poblaciones de depredadores y focas si disminuye la selección de cualquiera. Al no tener datos sobre las condiciones específicas de la nieve y el hielo local y por estaciones, tuvimos que basarnos en las tendencias a largo plazo de la cobertura promedio del hielo sobre el Mar Barents en abril como el cálculo de la tasa en la que disminuiría el hielo firme.

Para nuestros modelos de PVA, utilizamos el programa Vortex (Lacy, 2000; Lacy & Pollak, 2014), para poder emplear modelos flexibles e individuales para representar los aspectos de la historia de vida de los osos polares (la dependencia de las crías con su madre durante aproximadamente tres años y el retraso de la producción de camadas subsiguientes hasta que las crías se independizan o pierden). Para las dos especies de focas utilizamos el modelo Vortex como un modelo basado en la población, a pesar de que se pudieron haber usado otros programas de PVA o incluso proyecciones de matriz, siempre y cuando pudiesen incorporar relaciones funcionales con otras especies. Se vincularon los tres modelos de PVA con el programa MetaModel Manager (Lacy et al., 2013; Pollak & Lacy, 2014), el cual controla la secuencia en la que cada PVA simula su medida de tiempo (anual) y pasa los parámetros que describen el estado actual de cada población al otro modelo PVA. Se puede utilizar el metamodelo en una microcomputadora y solo requiere algunas horas para realizar 100 iteraciones de cada escenario evaluado. Nos centramos en las proyecciones del tamaño de las poblaciones, en vez de utilizar las probabilidades de extinción.

Notamos que debido a que utilizamos parámetros regionales, nuestro análisis no aborda amenazas a nivel de la especie por lo que no se pueden extrapolar nuestros resultados directamente a otras regiones.

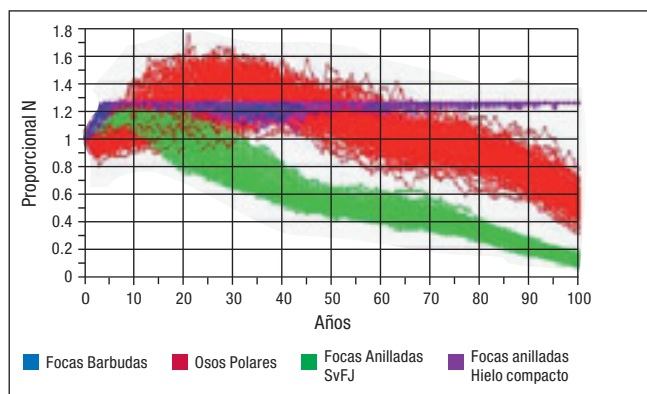
Se espera que los osos polares (*Ursus maritimus*) disminuyan dos tercios de su rango actual en las próximas décadas debido a las pérdidas de hielo oceánico y otros impactos negativos que tiene el cambio climático sobre su hábitat natural. ©Kit M. Kovacs & Christian Lydersen, NPI\_02

## 5. Resumen de los resultados

Las simulaciones del metamodelo proyectaron que a medida que la cubierta de hielo disminuya en primavera, disminuirá en paralelo el número de crías de focas anilladas en Svalbard (Figura CS 4.1). Esto causará una disminución del número de crías de osos polares que se pueden desarrollar en la región. Debido a la falta de selección, disminuirá la población adulta de focas anilladas, pero quizás después de un intervalo de 10 años o más dada la longevidad de esta pequeña foca ártica (vive hasta 45 años). Se puede retrasar la disminución de osos polares por décadas, debido a la continua disponibilidad de algunas crías de focas anilladas (aunque con pocas probabilidades de sobrevivencia) hasta el colapso de la población de focas adultas en reproducción. Las focas barbudas pueden experimentar una disminución temporal a medida que se convierten en la presa principal disponible para los osos polares, pero luego pueden recuperarse al disminuir la población de osos. No incluimos otros efectos del clima sobre las focas barbudas en el modelo, los cuales también pueden disminuir su población y por ende, acelerar la disminución de osos polares, dado que esta especie de focas sí exhibe un poco de resiliencia a las pérdidas del hielo marino, incluyendo el uso del hielo glaciar como sustrato para las crías.

A pesar de que las tendencias generales de los efectos de la disminución del hielo oceánico en las tres especies eran quizás predecibles a través de las relaciones incluidas en el metamodelo, hubiese sido difícil intuir la magnitud y la cronología de las respuestas de las especies. Se requiere un modelo cuantitativo del sistema para evaluar cuantitativamente la dependencia de las tendencias poblacionales de algunos parámetros del modelo, como la tasa de pérdida de hielo y los patrones de dispersión de las focas.





**Figura EC 4.1** Ejemplo ilustrativo de uno de los muchos escenarios de PVA utilizados para los tres mamíferos del Ártico. Se muestran las proyecciones de las tendencias de los tamaños de las poblaciones de las tres especies, con el supuesto de una disminución anual de 1% de la cobertura de hielo en primavera y ninguna dispersión entre Svalbard-Franz Josef (SvFJ) y el hielo compacto.

## 6. Resultados para la conservación

Se presentaron los resultados a representantes del Gobernador de Svalbard (la autoridad de gestión local), el Ministro del ambiente (gestión a nivel nacional), el Programa del Consejo del Ártico (AMAP, por sus siglas en inglés) (el Programa de Supervisión y Evaluación del Ártico), así como a miembros del Grupo de Especialistas sobre el Cambio Climático de UICN en un taller titulado “De PVA a la Política” en Svalbard, en otoño de 2014. A pesar de que las autoridades locales no podrán detener la disminución del hielo oceánico en el Mar de Barents, entender los mecanismos, la gravedad y la cronología de los impactos del cambio climático sobre las especies prioritarias en la región puede informar sobre la supervisión; la identificación de las áreas clave que pueden servir como refugio que contengan condiciones adecuadas para la sobrevivencia de los osos polares en el futuro y la gestión de los efectos indirectos (p.ej., exploración minera) sobre estas poblaciones de mamíferos y los impactos directos locales (p.ej., captura) sobre las dos especies de focas (Laidre et al., 2015).

## 7. Posibles mejoras

Este estudio demostró que se pueden utilizar los PVA vinculados a los metamodelos multi-especies para examinar cómo afectarían los aspectos del cambio climático a las especies y sus interacciones. Al igual que en cualquier análisis de sistemas complejos, existen límites sobre la exhaustividad y robustez de los análisis. Primero, los PVA y otros modelos mecanísticos siempre requieren información demográfica detallada y necesitan aún más comprender las tasas de supervivencia, los patrones de movimiento y la distribución reproductiva y los hábitats de alimentación de las focas árticas antes de que podamos predecir con seguridad las trayectorias de las poblaciones. Los metamodelos que vinculan los PVA en interacción también requieren más desarrollo para describir con precisión la manera en que las especies son dependientes entre sí.

La gran dependencia de los osos polares de Svalbard de las crías de las focas anilladas en la primavera, nos permitió explorar cómo el cambio climático puede afectar esta importante relación. No

se han examinado otros efectos del cambio climático en estas especies, incluyendo los efectos sobre sus relaciones con muchas otras especies (p.ej., las presas de las focas y otras presas de los osos polares y los depredadores subárticos y competidores que se mueven en las aguas polares en aumento). Probablemente no sea posible el desarrollo de modelos mecanísticos explícitos de las interacciones de las especies o al menos, no serán informativos sobre las tendencias dominantes de muchas especies a las que el cambio climático causa un sinfín de efectos más débiles y menos directos en una comunidad diversa, en vez de algunos acoplamientos fuertes entre las especies. Para tales casos, se puede requerir mayor nivel de descripción de las tendencias de tasas demográficas relacionadas a las variables climáticas a fin de desarrollar PVA más extensos que incluyan los impactos del cambio climático. A fin de predecir los impactos antes de que sean visibles en los conjuntos de datos a largo plazo, se deben entender y elaborar modelos de los mecanismos causales.

## 8. Referencias

- Hunter, C. M., H. Caswell, M. C. Runge, E. V. Regehr, C. Steve, I. Stirling, and S. Url. 2010. Climate change threatens polar bear populations: a stochastic demographic analysis. *Ecology* **91**:2883–2897.
- Kovacs, K. M., C. Lydersen, J. E. Overland, and S. E. Moore. 2011. Impacts of changing sea-ice conditions on Arctic marine mammals. *Marine Biodiversity* **41**:181–194.
- Lacy, R. C. 2000. Structure of the VORTEX simulation model for population viability analysis. *Ecological Bulletins* **48**:191–203.
- Lacy, R. C., P. S. Miller, P. J. Nyhus, J. P. Pollak, B. E. Raboy, and S. L. Zeigler. 2013. Metamodels for transdisciplinary analysis of wildlife population dynamics. *PLoS One* **8**:e84211.
- Lacy, R. C., and J. P. Pollak. 2014. VORTEX: A computer simulation model for Population Viability Analysis. Version 10.0. [www.vortex10.org/Vortex10.aspx](http://www.vortex10.org/Vortex10.aspx). Chicago Zoological Society, Brookfield, Illinois, USA.
- Laidre, K. L., H. Stern, K. M. Kovacs, L. Lowry, S. E. Moore, E. V. Regehr, S. H. Ferguson, Ø. Wiig, P. Boveng, R. P. Angliss, E. W. Born, D. Litovka, L. Quakenbush, C. Lydersen, D. Vongraven, and F. Ugarte. 2015. Arctic marine mammal population status, sea ice habitat loss, and conservation recommendations for the 21st century. *Conservation Biology* **29**:724–737.
- Laidre, K. L., I. Stirling, L. F. Lowry, O. Wiig, M. P. Heide-Jørgensen, and S. H. Ferguson. 2008. Quantifying the sensitivity of Arctic marine mammals to climate-induced habitat change. *Ecological Applications* **18**:S97–S125.
- Miller, P. S., R. C. Lacy, R. Medina-Miranda, R. López-Ortiz, and H. Díaz-Soltero. 2016. Confronting the invasive species crisis with metamodel analysis: An explicit, two-species demographic assessment of an endangered bird and its brood parasite in Puerto Rico. *Biological Conservation* **196**:124–132.
- Molnár, P. K., A. E. Derocher, G. W. Thiemann, and M. A. Lewis. 2010. Predicting survival, reproduction and abundance of polar bears under climate change. *Biological Conservation* **143**:1612–1622.
- Pollak, J. P., and R. C. Lacy. 2014. MetaModel Manager. Version 1.0.1. Platform for linking models into metamodels. [www.vortex10.org/MeMoMa.aspx](http://www.vortex10.org/MeMoMa.aspx). Chicago Zoological Society, Brookfield, Illinois, USA.
- Prowse, T. A. A., C. N. Johnson, R. C. Lacy, C. J. A. Bradshaw, J. P. Pollak, M. J. Watts, and B. W. Brook. 2013. No need for disease: Testing extinction hypotheses for the thylacine using multi-species metamodels. *Journal of Animal Ecology* **82**:355–364.
- Shoemaker, K. T., R. C. Lacy, M. L. Verant, B. W. Brook, T. M. Livieri, P. S. Miller, D. A. Fordham, and H. Resit Akçakaya. 2014. Effects of prey metapopulation structure on the viability of black-footed ferrets in plague-impacted landscapes: A metamodeling approach. *Journal of Applied Ecology* **51**:735–745.



## Estudio de caso 5. Peces de agua dulce de las montañas Apalaches, EE. UU.

Realizado por: Bruce E. Young

Basado en: Butler et al., 2014

### 1. Objetivos generales

La Cooperativa para la Conservación del Paisaje de la Región Apalache solicitó, en 2012, que se realizaran evaluaciones de vulnerabilidad al cambio climático de especies y hábitats importantes que existen en la región. En respuesta a esta necesidad, se conformó un panel científico de siete miembros a fin de determinar las especies a evaluar y los métodos a utilizar. Este estudio de caso se centra en la porción del estudio sobre los peces de agua dulce y tiene como objetivo determinar cuáles especies son vulnerables al cambio climático, hasta qué grado son vulnerables, y cuáles son los factores que causan tal vulnerabilidad.

Resumen de los objetivos de EVCC	
Objetivos	1. ¿Cuáles especies son vulnerables al cambio climático? 2. ¿Hasta qué grado son vulnerables? 3. ¿Por qué son vulnerables?
Foco taxonómico	Peces de agua dulce (104 especies)
Foco geográfico	Los estados que conforman la Cooperativa para la Conservación del Paisaje de la Región Apalache
Marco temporal	Desde el presente (2012) hasta mediados de siglo XXI (2050)

### 2. Contexto

En los Estados Unidos, las Cooperativas para la Conservación del Paisaje (LCC, por sus siglas en inglés) buscan integrar mejor la ciencia y la gestión para abordar el cambio climático y otros asuntos a escala del paisaje. A fin de lograrlo, reúnen a administradores de tierras y científicos de gobiernos federales, estatales y locales, así como tribus y primeras naciones, organizaciones no gubernamentales, universidades, al público interesado y a organizaciones privadas. Las 22 LCC están alineadas con los amplios límites de las ecoregiones. La LCC de la región Apalache comprende el área montañosa desde el norte de Alabama hasta el sur del estado de Nueva York; un área con un alto número de especies y diversidad de hábitat. La región tiene la mayor abundancia de salamandras del mundo y se encuentra entre las áreas más diversas de peces de agua dulce.

La LCC de la región Apalache eligió evaluar un conjunto de especies de peces a fin de servir a su amplio grupo de socios. El financiamiento fue limitado porque los recursos disponibles para realizar las evaluaciones (\$84.000) tenían que ser compartidos con el trabajo de un panel de expertos para seleccionar los métodos y las especies, así como para realizar evaluaciones de hábitat y otros grupos taxonómicos. El tiempo también fue limitado porque tanto la selección de los métodos y las especies, así como las propias evaluaciones, debían ser completadas en dos años.

### 3. Justificación del enfoque y los métodos

Los objetivos principales eran determinar cuáles especies eran vulnerables, cuál era su grado de vulnerabilidad y por qué eran vulnerables; por lo que con todos los enfoques: correlativos, basados en rasgos (TVA) y mecanísticos, se podían obtener resultados apropiados. Sin embargo, el tiempo y los fondos asignados al proyecto eran muy limitados como para realizar análisis mecanísticos de un gran número de especies. Además, al panel científico le preocupaba no tener tiempo suficiente para recolectar y revisar la calidad de los datos locales necesarios para utilizar el enfoque correlativo. Varias especies ya habían sido evaluadas utilizando el enfoque basado en rasgos funcionales por lo que el panel eligió este enfoque para realizar este trabajo.

Adecuación de los métodos				
	Correlativo	Basado en rasgos	Mecánico	Combinado
¿Cumple los objetivos?	En parte	Sí	Sí	Sí
¿Existen recursos disponibles?	No (no hay suficiente tiempo para revisar la precisión de los datos locales)	Sí	No (no hay suficiente tiempo ni financiamiento)	Posiblemente
¿Se seleccionó?	No	Sí	No	La CCVI puede utilizar los resultados del modelo correlativo donde existan

El método seleccionado para aplicar el enfoque TVA fue el Índice de Vulnerabilidad al Cambio Climático (CCVI, por sus siglas en inglés; Young *et al.*, 2012), el cual puede ser aplicado tanto para las especies de agua dulce como para las terrestres, y ya ha sido utilizado por las agencias estatales para evaluar peces de agua dulce. El CCVI es una herramienta gratuita y que se puede descargar en línea, programada en MS Excel que combina la información sobre la exposición climática, la sensibilidad y la capacidad de adaptación de las especies y, de tenerlos disponibles, los resultados de los modelos correlativos y la vulnerabilidad observada al cambio climático a fin de ubicar a cada especie en una de las cinco categorías de vulnerabilidad climática. Se deben de realizar evaluaciones sobre la distribución global de la especie o sobre cualquier parte que la componga. Con este método, la LCC de la región Apalache pudo generar una base de datos de las evaluaciones realizadas de la misma manera y realizar comparaciones entre las especies.

#### 4. Aplicación de los métodos

Primero, el panel determinó los criterios para seleccionar las especies focales del estudio con las siguientes características: (1) de importancia para la conservación (p.ej., si se encontraban en las listas federales de la Ley de Especies en Peligro de Extinción de los Estados Unidos, como especie de alta preocupación para la conservación de un estado); (2) importantes para el ecosistema en el que se encuentran; (3) indicadoras del cambio climático; (4) importantes para la gestión; (5) relevantes para la salud humana; o (6) con algún valor cultural. De este proceso de selección se obtuvo una lista de 104 especies.

La mayoría de estas especies ya habían sido evaluados al menos una vez en evaluación de vulnerabilidad a cambios climáticos a nivel estatal o regional (p.ej., al sur de la región Apalache). Las especies que no habían sido evaluadas previamente fueron analizadas siguiendo las directrices de CCVI (Young *et al.*, 2016). Brevemente, el CCVI separa la vulnerabilidad en dos componentes principales: la exposición de una especie al cambio climático en un área específica de evaluación; y su sensibilidad inherente y capacidad de adaptación al cambio climático. Para obtener los datos de exposición, los evaluadores utilizaron proyecciones climáticas de Climate Wizard (Girvetz *et al.*, 2009; [www.climatewizard.org](http://www.climatewizard.org)) para mediados del siglo XXI, escenario de emisión A1B, con un promedio colectivo de 16 Modelos de Circulación Global. Los evaluadores conocían las especies *in situ* y utilizaron la historia natural y la información de distribución disponible en la literatura científica para calificar 20 factores de sensibilidad y capacidad de adaptación. Estos factores incluían dos que consideraban los efectos indirectos de amenazas causadas por los humanos: la presencia de obstáculos antropogénicos para la dispersión que evitaba que las especies pudieran buscar climas favorables y la instalación de infraestructura de energía alternativa (p.ej., diques para la energía hidroeléctrica) que afectarían negativamente a las especies. En los casos en los que se realizó una modelación de la distribución para una especie también se utilizó el cambio en el tamaño del área proyectada, el grado previsto de superposición geográfica entre los rangos climáticos actuales y futuros, y la presencia de áreas protegidas en el área predicha en el futuro para calcular una categoría de vulnerabilidad general. Al utilizar los datos de exposición como un factor de ponderación de los datos de rasgos, el CCVI coloca a las especies en una de seis categorías: Extremadamente Vulnerable, Altamente Vulnerable, Moderadamente Vulnerable, Estable, Aumento Probable, Evidencia Insuficiente.

#### 5. Resumen de resultados

Las 104 especies evaluadas habían sido evaluadas 115 veces en diferentes oportunidades, y algunas de ellas recibieron hasta cuatro evaluaciones en diferentes partes de sus áreas de distribución. Los resultados muestran que solo un poco más de la mitad de las especies evaluadas podrían ser vulnerables en algún grado al cambio climático (Figura CS5.1). Algunas especies son altamente o extremadamente vulnerables. Los rasgos específicos que contribuyen a la vulnerabilidad varían según la especie. Las especies que habitan los ríos son vulnerables a los cambios climáticos hidrológicos que podrían alterar los caudales y a los cambios potenciales de su hábitat causados por la corrosión resultante de precipitaciones más extremas. Los peces de aguas

frías, como la trucha común (*Salvelinus fontinalis*) y *Cottus cognatus*, son vulnerables al aumento de la temperatura del agua. Algunas especies (p.ej., los peces *Ammocrypta pellucida*) también dependen de sustratos particulares poco comunes en los hábitats del cauce. Si cambia su nicho climático, las áreas de clima favorable futuro podrían no coincidir con estos sustratos. Las especies que habitan en los lagos son generalmente menos vulnerables al cambio climático.

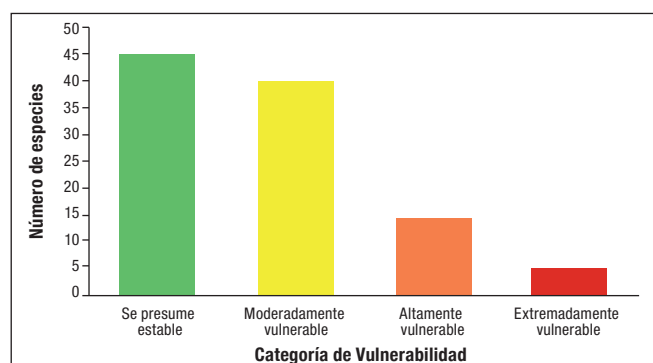
#### 6. Resultados para la conservación

El informe final fue publicado en 2014 (Butler *et al.*, 2014) y puesto a disposición en el sitio web de la LCC de la región Apalache donde los socios y el público en general pueden tener acceso a los datos. Con respecto a este documento, es muy pronto para evaluar hasta qué grado la información compilada en el informe ha sido utilizada para los esfuerzos de conservación. Algunas de las evaluaciones que se incluyen en el estudio fueron publicadas previamente como parte de los esfuerzos estatales para determinar la vulnerabilidad de la biodiversidad al cambio climático (Schlesinger *et al.*, n.d., Report *et al.* 2011). Por otra parte, estos resultados contribuyeron a actualizar los planes estatales de acción para la fauna, los cuales abordan la amenaza que representa el cambio climático a la biodiversidad. Dado que estos planes juegan un papel fundamental para guiar las inversiones de conservación del gobierno estatal, los resultados de las evaluaciones de vulnerabilidad probablemente tendrán influencia en las decisiones sobre las medidas específicas de adaptación que se tomarán para disminuir el impacto del cambio climático sobre la biodiversidad de estos estados.

#### 7. Posibles mejoras

Los métodos utilizados fueron los adecuados para llevar a cabo evaluaciones de un gran número de especies en poco tiempo. Dado que la mayoría de las especies ya habían sido evaluadas con un método particular, fue conveniente utilizar la misma metodología para toda la lista de especies. Una limitación de este enfoque es que diferentes evaluadores examinaron distintas especies, lo que potencialmente puede causar variación en la interpretación de los factores de los rasgos funcionales. Lo ideal hubiese sido que el mismo evaluador o grupo de evaluadores examinaran todas las especies de la lista (Lankford *et al.* 2014).

Se pueden tomar pasos adicionales para mejorar las evaluaciones futuras. Primero, los datos de exposición tendrían que ser tomados de las proyecciones climáticas del IPCC AR5 a fin de utilizar los datos más actuales disponibles. Además, se podrían rehacer los análisis utilizando ambos extremos del rango de las proyecciones climáticas de cada distribución de especie para clasificar los resultados y mostrar cómo la incertidumbre de las proyecciones climáticas pueden afectar la asignación de categoría de cada especie. La revisión de los borradores de las evaluaciones por parte de un grupo de expertos en peces de agua dulce no solo mejoraría la consistencia de la calificación de las especies, sino que garantizaría el uso de todos los datos de historia natural disponibles en las evaluaciones. Con más recursos se pueden realizar modelos de distribución para cada especie y combinar los resultados con métodos basados en rasgos funcionales para proporcionar un mejor contexto espacial a los resultados de las evaluaciones.



**Figura EC 5.1** Resultados de una evaluación basada en rasgos funcionales de la vulnerabilidad al cambio climático de 104 especies de peces de agua dulce de la región Apalache en los Estados Unidos.

## 8. Referencias

- Butler, P., K. Barrett, R. Cooper, H. Galbraith, K. Hall, H. Hamilton, J. O'Leary, L. Sneddon, and B. E. Young. 2014. Alternatives for Climate Change Vulnerability Assessment: Report to the Appalachian Landscape Conservation Cooperative. Arlington, Virginia.
- Girvetz, Evan H.; *et al.* 2009. Applied climate-change analysis: the climate wizard tool. *PLoS One* 4:e8320.
- Lankford; A. J., L. K. Svancara, J. J. Lawler, and K. Vierling. 2014. Comparison of climate change vulnerability assessments for wildlife. *Wildlife Society Bulletin* 38:386–394.
- Report; P., E. Byers, and S. Norris. 2011. Climate Change Vulnerability Assessment of Species of Concern in West Virginia. Elkins, West Virginia.
- Schlesinger; M. D., J. D. Corser, K. A. Perkins, and E. L. White. 2011. Vulnerability of At-risk Species to Climate Change in New York. Albany, NY.
- Young; B., E. Byers, G. Hammerson, A. Frances, L. Oliver, and A. Treher. 2016. Guidelines for Using the NatureServe Climate Change Vulnerability Index. Release 3.2. Arlington, Virginia.
- Young; B. E., K. R. Hall, E. Byers, K. Gravuer, G. Hammerson, A. Redder, and K. Szabo. 2012. Rapid assessment of plant and animal vulnerability to climate change. Pages 129–150 in J. Brodie, E. Post, and D. Doak, editors. *Conserving Wildlife Populations in a Changing Climate*. University of Chicago Press, Chicago, IL. CCVI: <http://www.natureserve.org/ccvi>

## Estudio de caso 6. EVCC basada en rasgos de UICN de los corales de arrecife de aguas cálidas a nivel global

Realizado por: Wendy B. Foden  
Basado en: Foden *et al.* 2014

### 1. Objetivos generales

En 2007 UICN propuso desarrollar un método de EVCC que pudiera ser aplicado a una amplia variedad de especies, incluyendo las raras y amenazadas, y en el que se pudieran considerar las características biológicas que afectan la vulnerabilidad de las especies al cambio climático. El método de EVCC resultante basado en rasgos funcionales fue aplicado experimentalmente en aves, anfibios y corales de arrecife de aguas cálidas del mundo y los resultados fueron publicados por Foden *et al.* (2013). Este caso de estudio cubre las evaluaciones globales de los corales.

### Resumen de los objetivos de EVCC

Objetivos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Proporcionar un marco para ayudar a los usuarios a evaluar sistemáticamente las posibles formas en las que el cambio climático afectará a las especies focales</li> <li>2. Identificar las especies de coral que se encuentran en mayor riesgo ante el cambio climático</li> <li>3. Identificar las regiones geográficas que contienen las especies de mayor riesgo</li> <li>4. Comparar la vulnerabilidad al cambio climático de las especies y el grado de amenaza de factores no climáticos (a saber, a través de la Lista Roja de UICN)</li> </ol>
Foco taxonómico	Todas las especies de arrecifes de coral de aguas cálidas
Foco geográfico	Global
Marco temporal	Desde el presente (2013) hasta mediados (2050) y finales del siglo (2090) XXI

## 2. Contexto

A medida que surgen los impactos que tiene el cambio climático en las especies, UICN identificó que los profesionales de la conservación, especialmente los que realizan las listas rojas, necesitaban una guía para reconocer y predecir las diversas maneras en las que se pueden manifestar los impactos; evaluar cómo estos aumentan la vulnerabilidad, y utilizar los resultados para evaluar el riesgo de extinción general de las especies. En respuesta, el Programa Global de Especies de UICN tomó la iniciativa de proporcionar un método para lograrlo. Se seleccionaron las aves, los anfibios y los corales de arrecife de aguas cálidas como taxa piloto, dada la disponibilidad de información actualizada de sus evaluaciones recientes de riesgo global, sus afinidades con diferentes ecosistemas, y el profundo impacto que están experimentando por el cambio climático. Los resultados de este estudio se publicaron en Foden *et al.* (2013) y se ha utilizado este enfoque a nivel regional para evaluar otros grupos taxonómicos; como mamíferos, reptiles, plantas y peces de agua dulce, entre otros (Carr *et al.*, 2013, 2014). Nos enfocamos en la EVCC global de los arrecifes de coral de aguas cálidas para este caso de estudio ya que representan un ejemplo menos común de EVCC de invertebrados marinos.

## 3. Justificación del enfoque y de los métodos

El uso de enfoques correlativos, incluyendo los modelos de distribución de las especies (SDM, por sus siglas en inglés) que predicen solo el cambio en el espacio geográfico, no fue posible, dado que nuestros objetivos incluían ayudar a los usuarios a evaluar sistemáticamente el amplio rango de mecanismos posibles a través de los cuales el cambio climático podría afectar a las especies. Además, muchas de las especies que los profesionales necesitan evaluar son raras y poco conocidas como para poder utilizar los SDM. Los modelos mecanísticos podrían haber servido para tal propósito, pero como se buscaba que el método pudiese ser aplicado en un amplio espectro de estrategias de historia de vida de una amplia variedad de especies para las que existían relativamente pocos datos disponibles y que fuese fácil de aplicar sin tener gran experiencia técnica o en elaboración de



**Tabla EC6.1** Muestra los conjuntos de rasgos generales asociados con la sensibilidad y la poca capacidad de adaptación (columna izquierda), los rasgos específicos de los arrecifes de coral de aguas cálidas utilizadas para evaluarlos (columna del medio), y los datos y umbrales que se utilizaron para calificar a las especies como de 'mayor vulnerabilidad' (columna derecha). También se muestran las medidas de exposición y sus umbrales (filas inferiores). (Adaptado de Foden et al. (2013); Tabla complementaria S3. Se discuten más detalles de los conjuntos de datos y las justificaciones de los umbrales en la sección de materiales complementarios).

Conjunto de rasgos	Rasgo	Umbral de 'mayor vulnerabilidad'
<b>SENSIBILIDAD</b>		
a. Hábitat especializado y/o requisitos de microhábitat	Necesidad de hábitat especializado	Ocorre en $\leq 13$ hábitats
	Dependencia a un microhábitat particular	Rango de profundidad $\leq 14$ m
b. Tolerancias o umbrales ambientales estrechos que posiblemente sean excedidos por el cambio climático en alguna etapa del ciclo de vida	Poca tolerancia a la temperatura - larvas	Los únicos métodos de reproducción conocidos son el desove y/o la incubación
	Evidencia de excedencia de tolerancia - adultos	Evidencia de mortalidad previa por alta temperatura de $> 30\%$ de la población local de un arrecife o extensión del mismo
	Menor capacidad de amortiguación en la profundidad	Profundidad máxima $< 20$ m
c. Dependencia a interacciones interespecíficas que probablemente se vean afectadas por el cambio climático	Alteración de la simbiosis con las algas <i>Zooxanthellae</i>	Tiene una interacción obligada con las algas <i>Zooxanthellae</i> y: (no tienen clados resilientes al blanqueamiento); o (tienen clados resilientes pero no se conocen los cambios entre ellos)
d. Rareza	Rareza	Raro (geográficamente restringidos o poco distribuidos)
<b>CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN</b>		
e. Poca capacidad de dispersión	Poca capacidad de dispersión intrínseca	Máximo periodo para el asentamiento de las larvas $\leq 14$ días
	Barreras extrínsecas para la dispersión	Las corrientes y/o la temperatura podrían retrasar la dispersión
f. Poca capacidad evolutiva	Lento reemplazo entre las generaciones	Longevidad típica de la colonia $\geq 50$ años
	Baja tasa de crecimiento	Tasa máxima típica de crecimiento $\leq 30$ mm al año
<b>EXPOSICIÓN</b>		
Cambio de temperatura	Exposición a las temperaturas que causan blanqueamiento	25% más alto: probabilidad media de blanqueamiento severo en el rango de la especie $\geq 0,85$ por año
CO2 elevado	Exposición a estados de saturación de bajo aragonito	25% más alto: proporción del rango de especies con saturación de aragonito $\Omega_{\text{arag}} \leq 3$ por 2050 $\geq 95,29\%$

modelos climáticos, tampoco fue posible su uso. Seleccionamos un enfoque basado en rasgos funcionales a fin de poder incluir un amplio rango de mecanismos de impacto, estrategias de historia de vida de las especies y, aunque el Sistema de Información de Especies de UICN (la base de datos que respalda la Lista Roja de UICN) contiene datos considerables de rasgos funcionales específicos de las especies, notamos que debíamos recolectar otros datos desde cero para poder realizar la EVCC.

Solo se habían realizado unas pocas evaluaciones de taxones específicos con base en rasgos funcionales al momento de iniciar el estudio por lo que, partiendo de esto, desarrollamos un nuevo método que se adaptara a todos los taxones. Utilizando la definición de vulnerabilidad del Grupo Intergubernamental

de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (IPCC 2007), consideramos las especies como de mayor vulnerabilidad si eran altamente sensibles, se encontraban altamente expuestas, y presentaban poca capacidad de adaptación al cambio climático. Utilizamos el conocimiento de expertos y una revisión de literatura especializada para identificar los cinco conjuntos o tipos genéricos de rasgos funcionales asociados a una alta sensibilidad al cambio climático, y tres con poca capacidad de adaptación (columna izquierda de la Tabla CS 6.1 para obtener los nombres y la Tabla 1 de Foden *et al.* (2013) para obtener una justificación y descripción completa de los mismos). Para cada uno de estos conjuntos de rasgos funcionales, seleccionamos aquellos específicos que aplicaban a nuestro grupo taxonómico focal.

Adecuación de los métodos				
	Correlativo	Con base en rasgos funcionales	Mecanístico	Combinado
¿Cumple los objetivos?	No (se excluirían muchas especies raras que se necesitan para explorar el rango completo de impactos)	Sí	Sí	Posiblemente
¿Existen recursos disponibles?	Datos de rango disponibles como polígonos, y no puntos específicos: posible, pero no ideal	Sí. Sin embargo, se deben recoger muchos rasgos desde cero.	No (799 especies = ¡demasiadas!)	Posiblemente
¿Se seleccionó?	No	Sí	No	No

## 4. Aplicación de los métodos

### Evaluación de la sensibilidad y la capacidad de adaptación

Para determinar el conjunto de rasgos específicos de los corales asociados a la sensibilidad y la capacidad de adaptación, consultamos diferentes expertos en corales en talleres y consultas individuales. Para identificar los rasgos funcionales se tuvo que evaluar: (i) los posibles escenarios de cambio climático y los aspectos clave de exposición; (ii) los mecanismos a través de los cuales probablemente afectarían a las especies focales; (iii) los rasgos asociados a un riesgo alto; y (iv) la disponibilidad de conjuntos de datos existentes que los describieran y, cuando fuese necesario, la posibilidad de recolectar estos datos a través de la historia natural obtenida de la literatura y del conocimiento de expertos. El conjunto de rasgos resultante (Tabla CS 6.1) representa un consenso entre los rasgos teóricos ideales para la EVCC y las consideraciones pragmáticas sobre la disponibilidad de datos y las prioridades de recolección de nuevos datos con respecto al tiempo y los recursos disponibles.

El objetivo era evaluar las 799 especies de arrecifes de coral de aguas cálidas, pero para cuatro de ellos no existieron datos de rasgos funcionales o de distribución, por lo que no pudimos categorizarlos y fueron dejados como ‘desconocidos’. Se recolectaron algunos datos ya existentes para algunas especies (p.ej. Veron, 2000) y de documentos científicos publicados; asimismo, una parte importante de información fue obtenida de los expertos. Siempre que fue posible recolectamos datos cuantitativos, en lugar de cualitativos, de tal manera que los análisis pudiesen ser revisados con mayor facilidad en el futuro, a medida que avanza el

conocimiento y las hipótesis sobre los mecanismos e impactos del cambio climático. Los datos fueron registrados en hojas de cálculo de Excel. Con frecuencia, fue difícil establecer los umbrales para evaluar las especies en las categorías de ‘alta vulnerabilidad’ de cada rasgo y en los casos en los que no había umbrales justificables claros, seleccionamos el 25% de las especies más afectadas. Reconocemos que este corte es arbitrario y discutimos los desafíos y las formas de avanzar en el estudio. A pesar de que el uso de umbrales relativos implica que los resultados de vulnerabilidad de la EVCC sean medidas relativas y no absolutas, consideramos que pueden ser útiles para identificar las especies con mayor riesgo y para explorar los posibles mecanismos a través de los cuales son o serán impactadas.

### Evaluación de la exposición al blanqueamiento y a la acidificación oceánica

A fin de evaluar la exposición, perfeccionamos los polígonos de distribuciones de las especies de corales de UICN limitándolos a las áreas en las que se han realizado mapas de los arrecifes (de acuerdo a la definición de Reefbase (2010)), las superficies de cambio superpuestas en el cambio de temperatura de la superficie marina y la saturación de aragonita para los años 2050 y 2080 (Tabla CS6.1 y sección de métodos en Foden et al., 2013). Basamos los resultados generales en el escenario de emisiones A1B de rango medio de 1975 a 2050, y los comparamos con evaluaciones que utilizan trayectorias alternativas de emisión (i.e., A2 y B1) y periodos más largos (1975–2090) a fin de calcular la incertidumbre de los resultados.

### Calificación de especies

Para obtener el valor de ‘más alta vulnerabilidad’, una especie requería calificaciones ‘altas’ en cada uno de los tres conjuntos de rasgos (sensibilidad, baja capacidad de adaptación y exposición). A fin de calificar como ‘sensible’, ‘de baja capacidad de adaptación’, o ‘expuesta’, una especie tenía que obtener una calificación ‘alta’ en cualquier rasgo asociado (p.ej., una especie con una calificación ‘alta’ en la especialización del hábitat fue considerada también con una calificación ‘alta’ en sensibilidad). Las calificaciones fueron calculadas bajo la hipótesis de que las especies ‘desconocidas’ para las que no habían suficientes datos disponibles presentaban la vulnerabilidad más alta o la más baja. Realizamos análisis de sensibilidad de nuestros datos variando cada umbral de calificación de los rasgos y evaluando el impacto para las especies y los patrones geográficos que surgían de estos.

## 5. Resumen de los resultados

Con este método se obtuvieron evaluaciones de ‘mayor’ y ‘menor’ vulnerabilidad para cada especie en diferentes escenarios de emisión y disponibilidad de datos. Como escenario de referencia utilizamos el escenario A1B para el año 2050 y consideramos a las especies de rasgos ‘desconocidos’ como de baja vulnerabilidad; utilizamos esto para lograr el Objetivo 1 de la EVCC, es decir, para evaluar a las especies que se encontraban en mayor riesgo ante el cambio climático. Se graficaron globalmente las concentraciones de especies incluidas en la categoría de mayor vulnerabilidad usando un SIG (Objetivo 2). Utilizamos los estados de la Lista Roja de UICN para comparar la vulnerabilidad de las especies al cambio climático

con su grado de amenaza por parte de factores no relacionados con el cambio climático (Objetivo 3). Obtuvimos información sobre la incertidumbre de los resultados examinándolos bajo otros escenarios de emisiones, periodos y suponiendo que las especies 'desconocidas' eran de mayor vulnerabilidad.

Identificamos a las especies de corales que consideramos como las más vulnerables al cambio climático. Encontramos que la mayor concentración de estas especies se encuentra en el "Triángulo de Coral", un área circundante de Sumatra y Java. Sin embargo, considerando la alta abundancia de especies en el área, la proporción de especies vulnerables no es mayor que en muchas otras áreas. Las especies del Caribe tienen un poco más probabilidad de vulnerabilidad al cambio climático. También identificamos a las especies con mayor vulnerabilidad al cambio climático que ya se encontraban como especies amenazadas en la Lista Roja de UICN. El aumento del blanqueamiento de los corales debido al calentamiento local sugiere que los corales se encuentran entre los grupos de especies más vulnerables al cambio climático; es por esto que enfatizamos que en vista de que nuestro método produce medidas relativas como resultado, las especies que no son incluidas en la categoría de 'mayor vulnerabilidad' también podrían ser considerablemente vulnerables.

## 6. Resultados para la conservación

El estudio identificó diferentes especies calificadas como de mayor vulnerabilidad al cambio climático, así como numerosas familias y las proporciones de éstas. Estos resultados son útiles para ayudar a los expertos a identificar las prioridades en la actualización

de evaluaciones de listas rojas y planes de gestión de especies y para aquellas para las que se deben considerar evaluaciones más profundas (p.ej., mediante modelos correlativos o mecanísticos). A escalas espaciales y taxonómicas más amplias, los resultados pueden ser útiles para identificar los tipos de mecanismos de respuesta al cambio climático que prevalecen en áreas particulares de grupos de especies y, en consecuencia, desarrollar estrategias de gestión. A escalas geográficas más grandes, los resultados son útiles para la planificación de conservación. Las regiones con altas concentraciones de especies de mayor interés deben recibir atención particular por parte de los profesionales de la conservación; sin embargo, las que tienen varias especies vulnerables al cambio climático pero que no están actualmente amenazadas también son importantes, ya que representan nuevas prioridades potenciales para la conservación.

El método basado en rasgos de UICN ya ha sido aplicado en muchos grupos taxonómicos y regiones geográficas diferentes (Carr et al., 2013, 2014; Meng et al., 2016) y ha ayudado a identificar especies, grupos de especies y áreas de prioridad para la conservación, incluyendo sitios a ser considerados patrimonio de la humanidad. El desarrollo simultáneo de EVCC y Listas Rojas, particularmente al este y oeste de África, ha demostrado la utilidad del método para considerar completa y sistemáticamente el cambio climático como una amenaza posible y para incorporar esta consideración en las evaluaciones de riesgo general de extinción. El método también ha sido utilizado para explorar enfoques combinados con base en rasgos funcionales y correlativos (ejemplo, Garcia et al., 2014a, 2014b; Willis et al., 2015).

La Rana elegante (*Cophixalus concinnus*) se encuentra actualmente incluida en la Lista Roja de UICN como En Peligro Crítico debido a su diminuto rango en Australia. Se proyecta que el aumento de las temperaturas obligará a la especie a trasladarse a mayores alturas y reducirá su rango aún más. Incluso en el caso de que logren trasladarse a lugares más altos, dado que las cimas de la región no son particularmente altas, estas ranas pronto no tendrán lugar al que trasladarse. © Stephen Williams





## 7. Posibles mejoras

Varios de los rasgos y umbrales de rasgos utilizados en nuestra evaluación se basaron en supuestos a priori en lugar de evidencia empírica sobre cómo afecta el cambio climático a cada especie. Con el avance de investigaciones en este campo pueden surgir datos sobre umbrales y posiblemente estas evaluaciones tendrían que ser actualizadas. Otros autores han explorado enfoques más sofisticados para combinar las calificaciones de rasgos combinados con evaluaciones generales de vulnerabilidad al cambio climático. Es posible que nuestro enfoque mejore al utilizar esta nueva información en las respuestas al cambio climático observadas en las especies. Finalmente, UICN planea desarrollar un módulo en su Sistema de Información de Especies (SIS, por sus siglas en inglés) para obtener y recolectar información sobre rasgos en especies que se relacionan al cambio climático, a fin de realizar evaluaciones de EVCC y de Listas Rojas.

## 8. Referencias

- Carr, J. A., A. F. Hughes, and W. B. Foden. 2014. Protected Areas Resilient to Climate Change: Climate Change Vulnerability Assessment of West African Species.
- Carr, J. A., W. E. Outhwaite, G. L. Goodman, T. E. E. Oldfield, and W. B. Foden. 2013. *Vital but vulnerable: climate change vulnerability and human use of wildlife in Africa's Albertine Rift*. (IUCN Species Survival Commission, Ed.). IUCN, Gland, Switzerland.
- Foden, W. B., S. H. M. Butchart, S. N. Stuart, J.-C. Vié, H. R. Akçakaya, A. Angulo, L. M. DeVantier, A. Gutsche, E. Turak, L. Cao, S. D. Donner, V. Katariya, R. Bernard, R. A. Holland, A. F. Hughes, S. E. O'Hanlon, S. T. Garnett, Ç. H. Şekercioğlu, and G. M. Mace. 2013. Identifying the World's Most Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians and Corals. *PLoS One* 8:e65427.
- García, R. A., M. B. Araújo, N. D. Burgess, W. B. Foden, A. Gutsche, C. Rahbek, and M. Cabeza. 2014a. Matching species traits to projected threats and opportunities from climate change. *Journal of Biogeography* 41:724–735.
- García, R. A., M. Cabeza, C. Rahbek, and M. B. Araújo. 2014b. Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science* 344:1247–1259.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. (P. J. van der L. and C. E. H. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, Ed.). Cambridge University Press, Cambridge.
- Meng, H., J. Carr, J. Beraducci, P. Bowles, W. Branch, C. Capitani, J. Chenga, N. Cox, K. Howell, R. Marchant, B. Mbilinyi, K. Mukama, P. J. Platts, I. Safari, S. Spawls, Y. Shennan-Farpon, P. Wagner, and N. D. Burgess. 2016. Tanzania's reptile biodiversity: distribution, threats and climate change vulnerability. *Biological Conservation*.
- ReefBase. 2010. [www.reefbase.org](http://www.reefbase.org).
- Veron, J. E. N. 2000. Corals of the World. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia.
- Willis, S. G., W. Foden, D. J. Baker, E. Belle, N. D. Burgess, J. Carr, N. Doswald, R. A. García, A. Hartley, C. Hof, T. Newbold, C. Rahbek, R. J. Smith, P. Visconti, B. E. Young, and S. H. M. Butchart. 2015. Integrating climate change vulnerability assessments from species distribution models and trait-based approaches. *Biological Conservation* 190:167–178.

## Estudio de caso 7. Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de la red de áreas protegidas del oeste de África para aves, mamíferos y anfibios

Realizado por: David J. Baker y Stephen G. Willis  
Basado en: Baker *et al.*, 2015

### 1. Objetivos generales

El cambio climático ya está comenzando a alterar la distribución de las especies en el mundo. Las redes de Áreas Protegidas (AP) son un elemento clave para proteger la biodiversidad ante el rápido cambio ambiental, aunque su naturaleza estática puede reducir potencialmente la efectividad de estas redes a medida que cambie la distribución de las especies. Por ello es fundamental evaluar los impactos potenciales que tendrá el cambio climático sobre la biodiversidad de estas redes a fin de tomar las medidas necesarias para mantener la capacidad de protección de las mismas.

El objetivo de nuestro estudio fue realizar la primera evaluación regional de los posibles impactos del cambio climático sobre la biodiversidad de la red del Área Protegida (AP) al oeste de África. Esto se logró por primera vez gracias a la disponibilidad de datos, recolectados cuidadosamente, sobre las distribuciones de las aves, mamíferos y anfibios de la región, datos sobre la ubicación de las áreas protegidas y la elaboración de modelos climáticos regionales personalizados capaces de capturar las características climáticas importantes de la región.

Resumen de los objetivos de la EVCC	
Objetivos	1. Evaluar el cambio potencial en la composición de las especies (recambio) en tres grupos de vertebrados (aves, mamíferos y anfibios) en las áreas protegidas de la región oeste de África, entre el periodo de referencia (1971 – 2000) y tres periodos futuros. 2. Evaluar el cambio potencial en la adecuación de los climas específicos para las especies en tres grupos de vertebrados (aves, mamíferos y anfibios) en las áreas protegidas de la región oeste de África, entre el periodo de referencia (1971 – 2000) y tres periodos futuros.
Foco taxonómico	Aves, mamíferos y anfibios
Foco geográfico	Oeste de África (red de áreas protegidas)
Marco temporal	Periodo de referencia (1971-2000) hasta el 2100 con los periodos focales 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100

### 2. Contexto

Realizamos este análisis como parte del proyecto de las Áreas Protegidas Resilientes al Cambio Climático (PARCC, por sus siglas en inglés) del oeste de África, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM). El objetivo del proyecto fue evaluar las vulnerabilidades al cambio climático de la red de AP al oeste de África, con especial enfoque en cinco países (Mali, Chad, Gambia, Togo y Sierra Leona), con el fin de identificar los riesgos potenciales y desarrollar planes para la gestión de adaptación para reducirlos. La evaluación basada en modelos de distribución de las especies fue desarrollada por la Universidad de Durham,

combinando datos sobre las distribuciones de las especies (UICN; BirdLife International), simulaciones climáticas (Met Office Hadley Centre) y la ubicación de las AP (PNUMA-CMCM).

### 3. Justificación del enfoque y los métodos

Nuestro enfoque para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático se basó en desarrollar modelos de la distribución de las especies para describir la relación estadística entre la distribución actual de una especie y el clima. Este enfoque tiene la ventaja de que existe amplia literatura, tiene hipótesis metodológicas y biológicas claras y requerimientos de datos relativamente bajos (con respecto a los modelos mecanísticos). Lo último fue particularmente importante ya que los datos demográficos específicos de las especies de la región del oeste de África son limitados.

Adecuación de los métodos				
	Correlativo	Basado en rasgos funcionales	Mecanístico	Combinado
¿Cumple los objetivos?	Sí	Sí	No	Sí
¿Existen recursos disponibles?	Habían recursos disponibles para un análisis regional a escala amplia	Habían recursos disponibles para un análisis regional de escala amplia	No había información suficiente disponible para casi ninguna de las especies	Sí
¿Se seleccionó?	Sí	Sí	No	Se incorporó información sobre la dispersión específica de las especies en los cambios de rango de distribución proyectados

### 4. Aplicación de los métodos

Elaboramos modelos de la distribución de 146 especies de anfibios, 768 aves y 382 mamíferos utilizando un enfoque de modelo de distribución de especies que busca capturar la incertidumbre probable de los modelos (es decir, debido a la incertidumbre generada por el método de elaboración de modelos climáticos y de las simulaciones climáticas). Se eligieron estos grupos taxonómicos porque sus datos de distribución en la región eran bastante completos y con suficiente resolución, lo que nos permitía evaluar los impactos en la comunidad de grupos completos de especies. Los datos de distribución fueron recolectados y verificados por UICN y BirdLife International (BirdLife & NatureServe, 2013; UICN, 2014) y los datos de la ubicación de las AP fueron recolectados y validados por el PNUMA-CMCM (UICN & PNUMA-CMCM, 2013).

No es fácil simular a través de los modelos climáticos los climas al oeste de África y de otras partes del mundo, y no todas las simulaciones climáticas son igualmente posibles en una región dada (McSweeney et al., 2012, 2014). Se seleccionaron las simulaciones del modelo de circulación general (GCM, por su siglas en inglés) del sistema climático global que mostró la mayor capacidad para describir las observaciones meteorológicas históricas de la región y el rango de respuestas al forzamiento del clima. Posteriormente, se redujeron las simulaciones de amplia resolución a una resolución espacial de 50 km utilizando el método de reducción dinámica (i.e., Jones et al., 2004). La reducción dinámica utiliza un modelo físico para simular las interacciones a escala local y regional en una pequeña región focal a mayor resolución que el GCM. Este enfoque puede incorporar los procesos que ocurren a resoluciones espaciales más pequeñas que los considerados por el GCM, como una representación más detallada de las costas, lo que produce una mejor simulación de los procesos terrestres y marítimos y una representación más detallada de la orografía de la superficie produciendo simulaciones más realistas de la temperatura local y los patrones de pluviosidad.

El enfoque de elaboración de modelos climáticos de distribución de especies utilizado siguió cuidadosamente el enfoque de Bagchi et al. (2013), en el que se construyó un conjunto de modelos para capturar la incertidumbre de diferentes fuentes cuantificables (p.ej., el algoritmo de modelación, las proyecciones climáticas y la incertidumbre por la dependencia espacial de los datos). Los algoritmos de modelación utilizados fueron: modelos lineales generalizados (GLM, por sus siglas en inglés), modelos aditivos generalizados (GAM, por sus siglas en inglés), modelos impulsados generalizados (GBM, por sus siglas en inglés) y bosques aleatorios (RF, por sus siglas en inglés). Se validaron los modelos de distribución de las especies internamente, utilizando un procedimiento de validación cruzada y evaluando la capacidad del modelo para predecir correctamente las presencias y ausencias de las especies a través del área bajo la curva ROC (AUC, por sus siglas en inglés).

Estos modelos se usaron para proyectar la distribución futura probable utilizando simulaciones del cambio climático bajo la hipótesis de que estas relaciones entre las especies y el clima permanecerán constantes en el tiempo. Utilizamos datos sobre las capacidades de dispersión específicas de las especies para establecer límites razonables de las distancias a través de las cuales se podría mover una especie en un periodo específico (siguiendo el enfoque de Barbet-Massin et al., 2012). Luego se realizaron mapas de la probabilidad de incidencia de una especie en una cuadrícula de 50 x 50 km (resolución original de los datos climáticos) para cada AP, asumiendo que el clima no es muy diferente al utilizado en los modelos de resolución más amplia. Luego se calculó la tasa de recambio de las especies, una medida del cambio de la comunidad en el tiempo y un indicador útil de impacto, entre el periodo de referencia y tres periodos futuros ("2040" = 2011-2040; "2070" = 2041-2070; "2100" = 2071-2100). Se evaluó la incertidumbre de los impactos proyectados, a nivel del AP y las especies, en el conjunto de proyecciones.

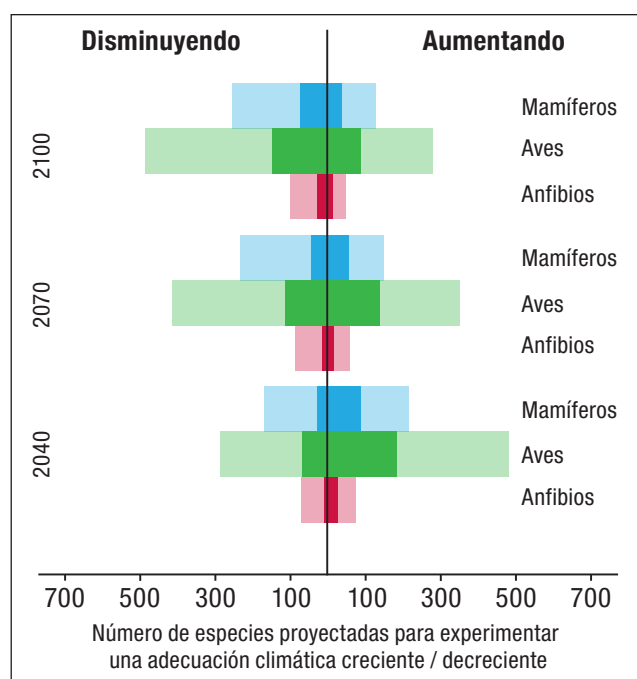
## 5. Resumen de los resultados

Se proyectó una tasa de recambio considerable de las especies en la red para los tres grupos taxonómicos para el año 2100 (anfibios = 42,5% (media); aves = 35,2%; mamíferos = 37,9%), lo que sugiere un gran cambio en la composición de la comunidad en las AP de la región. La incertidumbre en nuestros impactos proyectados es alta, especialmente para los anfibios y mamíferos, pero surgen patrones consistentes de impacto en los taxones para los inicios y mediados de siglo, lo que sugiere que habrá altos impactos en el bioma forestal de Guinea baja (centrada en Costa de Marfil).

Según el cambio de la adecuación climática, se proyecta que la mayoría de las especies de cada grupo taxonómico tendrán una menor adecuación en la red de AP para el año 2070 (anfibios= 63% de spp. (92 spp.); aves = 55% (419); mamíferos = 63% (239)). Esto se puede observar en la Figura CS7.1.

Se proyecta que las especies de anfibios de importancia para la conservación serán las que sufran los mayores impactos del cambio climático; se calcula que >75% de las especies de anfibios tienen “alta probabilidad” (es decir, de acuerdo a la mayoría de los modelos) de experimentar una disminución de la adecuación climática de la red de AP en todos los periodos.

## 6. Resultados para la conservación



**Figura EC 7.1** Número de especies en cada grupo taxonómico y cada periodo que probablemente experimentarán un aumento o disminución de la adecuación climática en la red de AP al oeste de África. El sombreado claro indica el número de especies que experimentarán un aumento o disminución de la adecuación climática de la red según un cálculo promedio de la adecuación en cada periodo, mientras que el sombreado oscuro indica las especies en las que el 95% de los cálculos de cambio de adecuación climática mostraron un consenso direccional (de aumento o disminución).

Los resultados de este análisis fueron publicados en una revista revisada por pares (Baker et al., 2015) y en un informe para el proyecto PARCC. Algunos de los resultados aparecerán en la base de datos en línea de Protected Planet con el fin de alertar a las personas sobre las vulnerabilidades específicas de las AP. Probablemente se utilizarán estos resultados en el futuro como guía para realizar investigaciones focales en la región. Sin embargo, actualmente es muy pronto para opinar sobre los impactos que tendrán estas evaluaciones de vulnerabilidad.

## 7. Posibles mejoras

Las mayores dificultades que se presentan al realizar evaluaciones de vulnerabilidad al cambio climático a gran escala yacen en las limitaciones de datos y el desfase entre la resolución espacial de los datos y la escala en la que los organismos responden al ambiente. Ahora se pueden utilizar evaluaciones de la vulnerabilidad al cambio climático en alta resolución para orientar estudios de campo sobre las especies más vulnerables y los lugares que probablemente experimentarán el mayor cambio ambiental. Éstas deben incluir monitoreo básico de las poblaciones de los diferentes grupos taxonómicos (plantas, invertebrados, mamíferos, aves) y evaluaciones demográficas detalladas de las especies focales, especialmente mediante la obtención de datos sobre abundancia, productividad y supervivencia de las especies. Esta información será fundamental para entender los mecanismos que vinculan los cambios demográficos con los ambientales y ayudará para la toma de decisiones de conservación en el futuro.

Un componente importante de este proyecto fue la colaboración de científicos climáticos que proporcionaron los datos de simulación climática regional. Nuestro enfoque para seleccionar los GCM y reducir estos datos a proyecciones a escalas más finas proporcionó un mayor grado de fiabilidad, ya que este estudio se basa en simulaciones climáticas que son factibles a nivel regional (Buontempo et al., 2015). Sin embargo, el costo técnico-operativo para producir estas simulaciones es considerable y probablemente prohibitivo en muchos casos, por lo que nuestra evaluación de impacto solo explora una sola trayectoria de emisión media, lo que puede ser sumamente conservador. No obstante, nuestro estudio sí incorpora la incertidumbre de los datos climáticos históricos (aunque se simulan aquí), lo que se ha probado ser muy importante en las evaluaciones de impactos ecológicos (Baker et al., 2016). En general, existen diversas maneras de mejorar el uso de datos climáticos en las evaluaciones de impactos ecológicos, pero esperamos que el enfoque de esta investigación contribuya con algunas ideas sobre buenas prácticas.

## 8. Referencias

- Bagchi R., Crosby M., Huntley B., Hole D.G., Butchart S.H.M., Collingham Y., Kalra M., Rajkumar J., Rahmani A., Pandey M., Gurung H., Trai L.T., Van Quang N., & Willis S.G. (2013) Evaluating the effectiveness of conservation site networks under climate change: accounting for uncertainty. *Global Change Biology*, **19**:1236–48.
- Baker D.J., Hartley A.J., Burgess N.D., Butchart S.H.M., Carr J.A., Smith R.J., Belle E., & Willis S.G. (2015) Assessing climate change impacts for vertebrate fauna across the West African protected area network using regionally appropriate climate projections. *Diversity and Distributions*, **21**:991–1003.



- Baker D.J., Hartley A.J., Butchart S., & Willis S.G. (2016) Choice of baseline climate data impacts projected species' responses to climate change. *Global Change Biology*, **22**:2392–2404.
- Barbet-Massin M., Thuiller W., & Jiguet F. (2012) The fate of European breeding birds under climate, land-use and dispersal scenarios. *Global Change Biology*, **18**:881–890.
- BirdLife & NatureServe (2013) Bird species distribution maps of the world. Version 3.0.
- Buontempo C., Mathison C., Jones R., Williams K., Wang, C., & McSweeney C. (2015) An ensemble climate projection for Africa. *Climate Dynamics*, **44**:2097–2118.
- IUCN (2014) The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2014.2.
- IUCN & UNEP-WCMC (2013) The World Database on Protected Areas (WDPA) [December Release].
- Jones R., Noguer M., Hassell D., Hudson D., Wilson S., Jenkins G., & Mitchell J. (2004) *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.
- McSweeney C.F., Jones R., & Booth B. (2012) Selecting Ensemble Members to Provide Regional Climate Change Information. *Journal of Climate*, **25**:7100–7121.
- McSweeney C.F., Jones R., Lee R., & Rowell D. (2014) Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions. *Climate Dynamics*, **44**:3237–3260.

## Estudio de caso 8. EVCC de enfoque correlativo-mecánico del lince ibérico

Realizado por: Resit Akcakaya  
Basado en: Fordham et al., 2013

### 1. Objetivos generales

Este estudio de caso se enfoca en evaluar la vulnerabilidad al cambio climático del lince ibérico (*Lynx pardinus*), y la efectividad de los planes de conservación para su recuperación. El lince ibérico se encuentra en riesgo de extinción debido a una combinación de efectos del cambio climático y a la pérdida de hábitat que afecta a la especie y su presa principal, el conejo común (*Oryctolagus cuniculus*), así como los efectos de dos enfermedades en la especie presa (Fordham et al., 2013).

Resumen de los objetivos de la EVCC	
Objetivos	1. ¿Cuán vulnerable es el lince ibérico a la extinción en diferentes escenarios de cambio climático? 2. ¿Cuán efectivas son las medidas actuales de conservación planificadas para esta especie? 3. ¿Cuán efectivo sería un nuevo plan de conservación que tome en cuenta el cambio climático?
Foco taxonómico	El lince ibérico y su presa, el conejo común
Foco geográfico	La Península Ibérica (el rango total esperado, actual y futuro, del lince)
Marco temporal	Desde el presente (2013) hasta finales del siglo (2090)

Más allá de esta especie particular, un objetivo más amplio del estudio fue proporcionar un marco para la elaboración de un modelo de próxima generación que incorpore simultáneamente los datos demográficos, de dispersión y de las interacciones bióticas (depredación y enfermedad) en el cálculo del riesgo de extinción y la evaluación de los planes de conservación para el cambio climático proyectado (Kissling 2013).

### 2. Contexto

El lince ibérico (*Lynx pardinus*) es una de las especies de mamíferos más amenazadas del mundo y se considera que está a punto de extinguirse. El tamaño de la población y el área de distribución del lince ibérico han disminuido considerablemente desde la década de los cincuenta. Más del 80% de la dieta de esta especie se basa en el conejo común (*Oryctolagus cuniculus*) cuya abundancia también ha disminuido considerablemente debido al virus de la mixomatosis en la década de los cincuenta, la enfermedad hemorrágica de los conejos de las décadas recientes, así como la caza excesiva y la pérdida y fragmentación de su hábitat. Además, la mortalidad del lince ibérico por causas humanas, como envenenamiento, caza ilegal y arrollamientos, también ha contribuido a la disminución de su población.

Se han iniciado programas de reproducción en cautiverio de esta especie para evitar su extinción y para reintroducirla en áreas adecuadas dentro de su rango de distribución histórico y, paralelamente, se han iniciado gestiones para aumentar la capacidades de los lugares de reintroducción de la especie. El cambio climático puede amenazar aún más la supervivencia de la especie, pero los planes de recuperación no han incorporado los cambios climáticos proyectados.

### 3. Justificación del enfoque y los métodos

El enfoque utilizado en este estudio de caso se basó en la idea de que el estado de conservación y recuperación de una especie es determinado por su hábitat y sus rasgos o características demográficas. En consecuencia, los enfoques que solo utilizan el hábitat proyectado no pueden evaluar adecuadamente la vulnerabilidad de las especies ni las opciones de conservación para su recuperación. Se deben incorporar explícitamente las interacciones bióticas, especialmente en las evaluaciones de especies que tienen fuertes interacciones con otras (como los depredadores que dependen una sola especie de presa).

El lince ibérico es afectado por diversas amenazas y también se encuentra sujeto a dinámicas de depredación en la que prácticamente depende del conejo, el cual a su vez está siendo afectado por enfermedades. Es por esto que para evaluar a la especie, requerimos de un enfoque novedoso que combinara demografía, dinámicas espaciales e interacciones bióticas. Fordham et al. (2013) usaron modelos de nicho ecológico asociados a simulaciones de metapoblación para investigar directamente los efectos combinados del cambio climático, la disponibilidad de presas y la intervención para la persistencia del lince ibérico. La novedad del enfoque yace en que modela las interacciones dinámicas bióticas de las especies en un escenario de cambio climático.

Adecuación de los métodos				
	Correlativo	Basado en rasgos	Mecanístico	Combinado
¿Cumple los objetivos?	En parte	No	En parte	Sí
¿Existen recursos disponibles?	Sí	Sí	Sí	Sí
¿Se seleccionó?	No	No	No	Sí

#### 4. Aplicación de los métodos

Fordham et al. (2013) recolectaron información sobre los siguientes aspectos del sistema de relación lince-conejo:

- Registros de presencia georreferenciados del lince ibérico y del conejo común.
- Datos de precipitación anual y temperatura media de los meses más cálidos y fríos (julio y enero, respectivamente). Según estudios anteriores, estas variables climáticas tienen el mayor potencial de afectar la abundancia de los linces ibéricos y los conejos.
- Series cronológicas anuales de estas variables bajo escenarios de cambio climático, generados de acuerdo a dos escenarios de emisiones.
- Datos de la cobertura del suelo (mapa de los tipos de cobertura).
- Mapa del Área Protegida.
- Datos de la serie cronológica del conejo común, tomados de la Base de Datos de las Dinámicas de la Población Global.
- Información demográfica del lince ibérico (incluyendo edad específica de supervivencia y fecundidad y dependencia de la densidad) y del conejo común (incluyendo las dinámicas de las enfermedades) de estudios anteriores.

Fordham et al. (2013) utilizaron estos datos para desarrollar modelos de nicho ecológico y demográficos (metapoblación) para ambas especies. El modelo de nicho ecológico determinó,

para cada especie, la favorabilidad ambiental y la distribución espacial del hábitat, que fueron la base espacial del modelo demográfico dinámico, a fin de simular los cambios temporales del hábitat de las especies. Esta relación entre los modelos de nicho y los demográficos siguieron los métodos aplicados en casos anteriores (Akçakaya et al., 2004, 2005; Keith et al., 2008; Fordham et al., 2012). Lo novedoso de este estudio fue la relación de los modelos de las dos especies para simular las interacciones bióticas. En resumen, se utilizaron los resultados del modelo del conejo como datos de entrada para el modelo del lince, de tal forma que la abundancia de los conejos fue uno de los factores que contribuyeron a la dinámica de la población de linces en cada paso de la simulación (además del clima y la cobertura del suelo).

Además de utilizar los modelos para calcular el riesgo de extinción del lince sin ninguna medida de conservación, también se modificó el modelo de los linces para probar la efectividad de translocarlos a áreas adecuadas como medida de conservación. Se probaron dos medidas de conservación: el plan actual de conservación y un plan optimizado considerando el cambio climático.

#### 5. Resumen de los resultados

Los resultados demostraron que el cambio climático anticipado disminuirá rápida y severamente la abundancia de los linces y probablemente cause la extinción de la especie en 50 años, aún si se realizan esfuerzos globales importantes para mitigar las emisiones de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, los datos también mostraron que un programa de reintroducción planificado cuidadosamente y que considere los efectos del cambio climático, la abundancia de presas y la conectividad de los hábitats podría evitar su extinción y lograr su recuperación. En cambio, los resultados demostraron que el plan de conservación actual, el cual no incluye los efectos del cambio climático, no conducirá a la recuperación del lince ibérico y probablemente no pueda evitar su extinción.

Se proyecta la disminución de la productividad del lago Tanganyika, en África Central. Su profundidad extrema causa corrientes de convección que llevan las aguas profundas ricas en nutrientes a la superficie haciéndolo altamente productivo. Sin embargo, el aumento de la temperatura del agua de la superficie, causado por el cambio climático, disminuirá la extensión de la mezcla de las aguas. Los pescadores del pueblo de Kala, en Tanzania, han informado sobre la disminución de sus capturas de peces en la última década. La disminución de la productividad del lago también afectará probablemente sus ecosistemas y especies. © Wendy Foden



## 6. Resultados para la conservación

Las translocaciones como una acción de conservación serán cada vez más utilizadas a medida que más especies se vean afectadas por el cambio climático y la pérdida de hábitat. Un paso importante para la planificación de estas translocaciones es calcular la efectividad de planes alternativos, los cuales pueden divergir con respecto a la ubicación de las poblaciones de origen y objetivo, el número, sexo y edad de los individuos a translocar, y la frecuencia y momento de las translocaciones. Esto se puede realizar simulando la dinámica de las especies focales a través de modelos en los que se consideren las poblaciones origen y objetivo como subpoblaciones de una metapoblación (p.ej., Kuemmerle et al., 2011). Este estudio demostró el uso de modelos para calcular los efectos de las translocaciones en las especies y, por primera vez, la importancia de incorporar la disponibilidad de presas, el cambio climático y su interacción en los modelos a fin de diseñar planes de conservación para evitar la extinción de las especies.

## 7. Referencias

- Akçakaya, H. R., J. Franklin, A. D. Syphard, and J. R. Stephenson. 2005. Viability of bell's sage sparrow (*amphispiza belli* ssp. *belli*): altered fire regimes 15:521–531.
- Akçakaya, H. R., V. C. Radeloff, D. J. Mladenoff, and H. S. He. 2004. Integrating Landscape and Metapopulation Modeling Approaches: Viability of the Sharp-Tailed Grouse in a Dynamic Landscape. *Conservation Biology* 18:526–537.
- Fordham, D. A., H. R. Akçakaya, B. W. Brook, A. Rodríguez, P. C. Alves, E. Civantos, M. Triviño, M. J. Watts, and M. B. Araújo. 2013. Adapted conservation measures are required to save the Iberian lynx in a changing climate. *Nature Climate Change* 3:899–903.
- Fordham, D. A., H. Resit Akçakaya, M. B. Araújo, J. Elith, D. A. Keith, R. Pearson, T. D. Auld, C. Mellin, J. W. Morgan, T. J. Regan, M. Tozer, M. J. Watts, M. White, B. A. Wintle, C. Yates, and B. W. Brook. 2012. Plant extinction risk under climate change: Are forecast range shifts alone a good indicator of species vulnerability to global warming? *Global Change Biology* 18:1357–1371.
- Keith, D. A., H. R. Akçakaya, W. Thuiller, G. F. Midgley, R. G. Pearson, S. J. Phillips, H. M. Regan, M. B. Araújo, and T. G. Rebelo. 2008. Predicting extinction risks under climate change: coupling stochastic population models with dynamic bioclimatic habitat models. *Biology Letters* 4:560–563.
- Kissling, W. D. 2013. Estimating extinction risk under future climate change: next-generation modeling simultaneously incorporates demography, dispersal, and biotic interactions. *Frontiers of Biogeography* 5:3–6.
- Kuemmerle, T., K. Perzanowski, H. R. Akçakaya, F. Beaudry, T. R. Van Deelen, I. Parnikoza, P. Khoyetskyy, D. M. Waller, and V. C. Radeloff. 2011. Cost-effectiveness of strategies to establish a European bison metapopulation in the Carpathians. *Journal of Applied Ecology* 48:317–329.

## Estudio de caso 9. Combinación de los rasgos funcionales de las especies con las proyecciones del modelo correlativo en un enfoque combinado de EVCC

Realizado por: Raquel A. Garcia

Basado en: Garcia et al., 2012

### 1. Objetivos generales

La evaluación de la vulnerabilidad de las especies requiere entender la exposición de éstas a amenazas extrínsecas, y su sensibilidad intrínseca o capacidad de adaptación para responder a las amenazas. Aunque los enfoques basados en rasgos funcionales pueden combinar los componentes de exposición y sensibilidad/capacidad de adaptación para obtener calificaciones de vulnerabilidad, las medidas de exposición que se utilizan son, con frecuencia, simples y se encuentran espacialmente limitadas al área de distribución presente de las especies. Al utilizar los modelos correlativos para evaluar la exposición, se pueden realizar mapas de las pérdidas, ganancias y fragmentaciones de las áreas potenciales adecuadas a fin de tener una mejor comprensión de las diferentes amenazas (y oportunidades) que puede enfrentar una especie. También se puede comparar cada amenaza con los rasgos intrínsecos que podrían mediar las respuestas de la especie a una amenaza particular. Los rasgos específicos probablemente produzcan respuestas a diferentes amenazas (Isaac y Cowlshaw 2004, Murray et al. 2011), pero hasta ahora, esta especificidad no ha sido lo suficientemente abordada en las EVCC. En este caso de estudio presentamos un enfoque combinado de EVCC que utiliza las fortalezas de los modelos correlativos y de rasgos funcionales a fin de obtener resultados espacialmente explícitos.

Resumen de los objetivos de la EVCC	
Objetivos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Describir las amenazas extrínsecas proyectadas y las respuestas geográficas al cambio climático proporcionadas por los modelos correlativos: pérdidas, ganancias y fragmentación del espacio climático adecuado para las especies.</li> <li>2. Seleccionar los rasgos que podrían mediar respuestas de las especies a cada una de las amenazas y oportunidades.</li> <li>3. Examinar la superposición espacial entre las dos a fin de identificar las áreas en las que las especies se pueden encontrar expuestas a amenazas extrínsecas e intrínsecamente vulnerables a ellas.</li> </ol>
Foco taxonómico	Anfibios
Foco geográfico	África subsahariana
Marco temporal	Desde 1961-90 al 2050



Utilizamos resultados de modelos correlativos de 195 especies de anfibios africanos subsaharianos (García et al., 2012) y calculamos el grado de pérdida, ganancia y fragmentación de un área climática adecuada para cada una. Basados en trabajos empíricos y teóricos previamente publicados, identificamos los “rasgos de mediación de respuesta” potenciales para cada cambio proyectado y recolectamos aquellos para los que había datos disponibles para nuestras especies. Superponiendo espacialmente las áreas de cambios extrínsecos proyectados y las de alta vulnerabilidad intrínseca, realizamos mapas de las áreas geográficas en las que las especies se encontraban expuestas y vulnerables al cambio climático.

## 2. Contexto

Nos enfocamos en los anfibios africanos subsaharianos por tres razones. Primero, se espera que estas especies sean altamente vulnerables al cambio climático. Las poblaciones de anfibios están disminuyendo mundialmente debido a diferentes amenazas, entre ellas, la destrucción de hábitat, el cambio climático y la enfermedad micótica quitridiomycosis (Blaustein y Kiesecker 2002, Hof et al., 2011, Lit et al., 2013). Se proyecta que el cambio climático, muchas veces conjuntamente con el cambio en el uso de suelo, afectará grandes áreas de África tropical en el futuro (Hof et al., 2011, Foden et al., 2013). Segundo, aprovechamos los resultados de modelos correlativos (García et al., 2012) y datos de rasgos funcionales (Foden et al., 2013) disponibles. Tercero, un caso de estudio centrado en los anfibios africanos subsaharianos ilustra la aplicación de nuestro marco cuando no se disponen de datos sobre los rasgos (Violle et al., 2007), lo que es común en muchos grupos taxonómicos (González-Suárez et al., 2012). Los Investigadores que participaron en trabajos previos usando modelos correlativos (Raquel A. García, Miguel B. Araújo, Mar Cabeza, Carsten Rahbek y Neil D. Burgess) y basados en rasgos (Wendy B. Foden y Alexander Gutsche) se reunieron para realizar este estudio.

## 3. Justificación del enfoque y los métodos

Nuestro objetivo fue identificar áreas geográficas en las que las especies se encontraran potencialmente expuestas a amenazas del cambio climático debido a sensibilidad o falta de capacidad de adaptación para responder a ellas. También buscamos identificar sitios de posible expansión de la distribución de especies por efecto del cambio climático. Pese a que los modelos mecanísticos serían el método de EVCC más adecuado para abordar esta inquietud, no contamos con los datos fisiológicos requeridos. Los métodos basados en rasgos funcionales solo podrían abordar parcialmente el problema, porque no se podrían determinar nuevas áreas que fuesen climáticamente adecuadas ni la fragmentación de las áreas climáticas adecuadas. Dado que teníamos disponibles los resultados de modelos correlativos y basados en rasgos, seleccionamos una combinación de éstos.

Adecuación de los métodos				
	Correlativo	Basado en rasgos	Mecanístico	Combinado
¿Cumple los objetivos?	No	Sí	Sí	Sí
¿Existen recursos disponibles?	Sí	Sí	No	Sí
¿Se seleccionó?	No	No	No	Sí

A fin de considerar las pérdidas proyectadas, aumento de la fragmentación y ganancias de área climáticamente favorable, seleccionamos rasgos potenciales de mediación de respuesta y evaluamos su superposición espacial con la vulnerabilidad respecto a los rasgos considerados relevantes de cada caso. Examinamos la superposición para todas las especies y para los grupos de especies individualmente utilizando diferentes combinaciones de amenazas y oportunidades.

## 4. Aplicación de los métodos

Aplicamos este enfoque metodológico a 195 anfibios africanos subsaharianos con proyecciones de los modelos bioclimáticos para mediados del siglo XXI (García et al., 2012) y datos de rasgos funcionales (Foden et al., 2013). Se excluyeron 500 especies de rango pequeño con incidencia en las áreas montañosas. Se procesaron y realizaron mapas de los resultados de los modelos correlativos y los datos de rasgos (suministrados en hojas de cálculo) en R (R Development Core Team 2010).

Primero, a fin de caracterizar las amenazas y oportunidades inducidas por el cambio climático para cada especie, comparamos las proyecciones de la adecuación climática de referencia y futura para calcular las pérdidas, la fragmentación y la ganancia de área climáticamente favorable, así como las distancias a nuevas áreas adecuadas. Obtuvimos mapas de los cambios para cada especie y recopilamos los mapas compuestos de todas las especies utilizando los mapas individuales.

Segundo, basados en estudios teóricos y empíricos, seleccionamos “rasgos de mediación de respuesta” potenciales para cada amenaza. Entre ellos, seleccionamos los rasgos (o indicadores de rasgos) para los que teníamos datos disponibles. Asignamos, a cada rasgo calificaciones de sensibilidad/capacidad de adaptación “alta”, “baja” o “desconocida”, de acuerdo con los umbrales preseleccionados (Foden et al., 2013). Tercero, realizamos mapas de cada amenaza extrínseca y los superpusimos con los mapas de clasificación de los rasgos relevantes para esa amenaza. Por cada combinación de amenaza extrínseca y rasgo de mediación de respuesta (p.ej., ganancias proyectadas de adecuación climática y capacidad de dispersión), obtuvimos resultados del número de especies expuestas a una amenaza y consideradas sensibles o con capacidad de adaptación baja para responder a esa amenaza versus el número de especies expuestas a una amenaza pero consideradas menos sensibles o con alta capacidad de adaptación para responder al cambio climático.

## 5. Resumen de los resultados

Se generaron mapas de los resultados para determinar las áreas de superposición de exposición y alta sensibilidad y/o baja capacidad de adaptación para un gran número de especies. En la cuenca del Congo y las zonas áridas de Suráfrica, las pérdidas proyectadas para los anfibios de amplia distribución se debieron a una alta sensibilidad a la variación climática, mientras que las ganancias esperadas fueron descartadas por la baja capacidad de dispersión. La superposición espacial entre la exposición y la vulnerabilidad fue más pronunciada para las especies en las que se proyectaba una contracción de su espacio climático in situ o que se trasladarían a áreas geográficas distantes. Nuestros resultados excluyeron la exposición potencial de las especies de áreas de distribución restringidas en las montañas de las zonas tropicales de África.

## 6. Resultados para la conservación

El trabajo fue publicado en la revista *Journal of Biogeography* (García et al., 2014). Ilustramos la aplicación del enfoque combinando las proyecciones espaciales de la exposición al cambio climático con los rasgos funcionales que probablemente mediarán las respuestas de las especies. Aunque el marco propuesto establece varias hipótesis que requieren de más investigación, su aplicación añade realismo a las EVCC basadas en modelos correlativos que consideran que todas las especies serán afectadas de igual manera por las amenazas y oportunidades inducidas por el cambio climático.

## 7. Posibles mejoras

Los datos de rasgos funcionales utilizados en este trabajo son principalmente características ecológicas de las especies o de sus áreas de distribución, en lugar de rasgos en sentido estricto (Violle et al., 2007), por lo que no representan adecuadamente los rasgos, sino su interacción con el ambiente. Generalmente no es fácil tener acceso a datos de rasgos funcionales de alta calidad, pero, cuando sea posible, se debería utilizar datos de medidas directas. Por ejemplo, la medida de tolerancia a la variación climática, que aquí se infiere con enfoques estadísticos que relacionan áreas de distribución actuales de las especies con variables climáticas, debe resultar de un enfoque experimental aplicado para calcular los límites térmicos (Arribas et al., 2012). De la misma manera, los cálculos de la capacidad de dispersión de las especies deberían de provenir de datos empíricos sobre los movimientos de los organismos (p.ej., Gamble et al., 2007); las distancias filogenéticas (Arribas et al., 2012) o los rasgos morfológicos o de historia de vida (Whitmee et al., 2012, Baselga et al., 2012) predecirían con mayor precisión la habilidad de las especies de rastrear climas adecuados que los basados en rangos geográficos conocidos, como lo aplicamos en este trabajo. Del mismo modo, los umbrales para la clasificación de la sensibilidad o capacidad de adaptación de las especies, basados aquí en los rasgos seleccionados, deberían basarse, en la medida de lo posible, en datos empíricos.

Dada las limitaciones de datos (con respecto a los rasgos funcionales, pero principalmente a los modelos correlativos disponibles), el análisis excluye a la mayoría de los anfibios amenazados, particularmente los provenientes de las tierras altas de Camerún y los centros de diversidad afromontana oriental. Existen métodos de inferencia filogenética que podrían reducir los sesgos de los datos de rasgos (Nakagawa y Freckleton 2008, Buckley y Kingsolver

2012), pero para el grupo de especies excluido en este trabajo se deben desarrollar nuevos enfoques que superen las limitaciones de los modelos correlativos para evaluar la vulnerabilidad al cambio climático de las especies de áreas de distribución restringidas.

## 8. Referencias

- Arribas, P., P. Abellán, J. Velasco, D. T. Bilton, A. Millán, and D. Sánchez-Fernández. 2012. Evaluating drivers of vulnerability to climate change: a guide for insect conservation strategies. *Global Change Biology* **18**:2135–2146.
- Baselga, A., J. M. Lobo, J.-C. Svenning, P. Aragón, and M. B. Araújo. 2012. Dispersal ability modulates the strength of the latitudinal richness gradient in European beetles. *Global Ecology and Biogeography* **21**:1106–1113.
- Blaustein, A. R., and J. M. Kiesecker. 2002. Complexity in conservation: lessons from the global decline of amphibian populations. *Ecology Letters* **5**:597–608.
- Buckley, L. B., and J. G. Kingsolver. 2012. Functional and phylogenetic approaches to forecasting species' responses to climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **43**:205–226.
- Foden, W. B., S. H. M. Butchart, S. N. Stuart, J.-C. Vié, H. R. Akçakaya, A. Angulo, L. M. DeVantier, A. Gutsche, E. Turak, L. Cao, S. D. Donner, V. Katariya, R. Bernard, R. A. Holland, A. F. Hughes, S. E. O'Hanlon, S. T. Garnett, Ç. H. Şekercioğlu, and G. M. Mace. 2013. Identifying the World's Most Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians and Corals. *PLoS One* **8**:e65427.
- Gamble, L. R., K. McGarigal, and B. W. Compton. 2007. Fidelity and dispersal in the pond-breeding amphibian, *Ambystoma opacum*: Implications for spatio-temporal population dynamics and conservation. *Biological Conservation* **139**:247–257.
- García, R. A., M. B. Araújo, N. D. Burgess, W. B. Foden, A. Gutsche, C. Rahbek, and M. Cabeza. 2014. Matching species traits to projected threats and opportunities from climate change. *Journal of Biogeography* **41**:724–735.
- García, R. A., N. D. Burgess, M. Cabeza, C. Rahbek, and M. B. Araújo. 2012. Exploring consensus in 21st century projections of climatically suitable areas for African vertebrates. *Global Change Biology* **18**:1253–1269.
- González-Suárez, M., P. M. Lucas, and E. Revilla. 2012. Biases in comparative analyses of extinction risk: mind the gap. *Journal of Animal Ecology* **81**:1211–1222.
- Hof, C., M. B. Araújo, W. Jetz, and C. Rahbek. 2011. Additive threats from pathogens, climate and land-use change for global amphibian diversity. *Nature* **480**:516–519.
- Isaac, N. J. B., and G. Cawlishaw. 2004. How species respond to multiple extinction threats. *Proceedings. Biological sciences / The Royal Society* **271**:1135–41.
- Li, Y., J. M. Cohen, and J. R. Rohr. 2013. Review and synthesis of the effects of climate change on amphibians. *Integrative Zoology* **8**:145–161.
- Murray, K. A., D. Rosauer, H. McCallum, and L. F. Skerratt. 2011. Integrating species traits with extrinsic threats: closing the gap between predicting and preventing species declines. *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences* **278**:1515–23.
- Nakagawa, S., and R. P. Freckleton. 2008. Missing inaction: the dangers of ignoring missing data. *Trends in Ecology & Evolution* **23**:592–596.
- R Development Core Team. 2010. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Violle, C., M.-L. Navas, D. Vile, E. Kazakou, C. Fortunel, I. Hummel, and E. Garnier. 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos* **116**:882–892.
- Whitmee, S., C. D. L. Orme, and M. Humphries. 2012. Predicting dispersal distance in mammals: a trait-based approach. *The Journal of Animal Ecology* **82**:211–221.

## Estudio de caso 10. Enfoque combinado para EVCC de la mariposa de montaña ojitos (*Erebia epiphron*) y el escarabajo ciervo (*Lucanus cervus*) en Gran Bretaña

Realizado por: Chris J. Wheatley y Chris D. Thomas  
Basado en: Thomas et al., 2011

### 1. Objetivos generales

Los enfoques para la evaluación del riesgo para las especies que se utilizan convencionalmente pueden no ser las herramientas más apropiadas para evaluar a especies que disminuyen en algunas regiones pero que se trasladan a otras, lo que probablemente ocurra comunmente con el cambio climático. La necesidad de considerar las regiones de expansión y las de contracción separadamente surge porque sus causas (y por ende, cualquier acción de conservación) pueden ser diferentes. Además, los enfoques convencionales de evaluación de riesgo rara vez funcionan en escalas de tiempo prolongado, que es en las que se espera que las especies respondan al cambio climático. En este trabajo desarrollamos un marco metodológico para evaluar las respuestas de las especies al cambio climático, que incluya tanto las observadas como esperadas, con el fin de identificar las prioridades de conservación. Este marco puede ser considerado, al igual que en el caso de las Listas Rojas de UICN, como un proceso iterativo en donde se pueden rehacer las evaluaciones a medida que existan mejores datos disponibles sobre las tendencias observadas o se desarrollen mejores modelos de los prospectos futuros.

Este enfoque se aplica a especies individuales y evalúa las disminuciones netas en el área actualmente ocupada y las expansiones hacia nuevas áreas por efecto del cambio climático. Se puede aplicar a cualquier extensión espacial (distribuciones regionales, continentales o globales) y resolución (desde información a nivel poblacional hasta distribuciones de cuadrícula); y complementa los protocolos de evaluación de conservación existentes, como las listas rojas, con superposición de entradas de datos y requerimientos. Es posible realizar evaluaciones sistemáticas del estado de conservación de las especies utilizando datos observados y proyectados de las poblaciones y/o áreas de distribución, con el fin de orientar monitoreos, medidas de adaptación y planificar la gestión de la conservación de las especies en respuesta al cambio climático.

Una pareja de mariposas medioluto norteadas (*Melanargia galathea*) en el sitio de su colonización asistida al norte de Inglaterra. El rango de estas mariposas se ha movido hacia el norte, debido al aumento de las temperaturas. Esta área se encuentra fuera de su rango histórico pero ahora se ha convertido en lo suficientemente cálida para ellas. © Steve Willis



Resumen de los objetivos de la EVCC	
Objetivos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identificar la disminución (dentro de una distribución existente) y expansión (a nuevas regiones) de especies individuales como respuesta al cambio climático.</li> <li>2. Identificar las especies más vulnerables al cambio climático.</li> <li>3. Identificar las especies potencialmente beneficiadas por el cambio climático.</li> <li>4. Orientar el monitoreo, medidas de adaptación y planificación para la conservación de las especies de cara al cambio climático.</li> </ol>
Foco taxonómico	Mariposa montañesa ojitos ( <i>Erebia epiphron</i> , Lepidoptera) y escarabajo ciervo volante ( <i>Lucanus cervus</i> , Coleoptera)
Foco geográfico	Gran Bretaña
Marco temporal	Desde la distribución histórica (1980) hasta finales del siglo XXI (2080)

### 2. Contexto

Se desarrolló una evaluación de vulnerabilidad a través de la Red de Biología de Poblaciones del Reino Unido (UKPopNet, financiada por el Consejo de Investigación del Medio Ambiente del Reino Unido e English Nature), un proyecto interdisciplinario con la contribución de científicos, legisladores y conservacionistas. Inspirado en el proceso de las listas rojas de UICN, el proyecto de evaluación de la vulnerabilidad tiene como objetivo identificar cómo se podría combinar la información, cada vez mayor, sobre las respuestas observadas de una especie al cambio climático en las décadas recientes con las respuestas futuras proyectadas para la misma, a fin de obtener evaluaciones realistas de conservación.

Dado que muchas de las especies de Gran Bretaña se encuentran en su límite norte de su distribución (hacia el polo), se espera que respondan de manera positiva al cambio climático y expandan sus distribuciones. Las evaluaciones de vulnerabilidad deberían de incorporar la posibilidad de expansión, en vez de incluir solamente los riesgos de disminución que generalmente se consideran en estas evaluaciones. Esto ayudaría a identificar estrategias de conservación para facilitar las expansiones, así como las estrategias para reducir la disminución de especies. Facilitar las expansiones podría ser importante para mantener la biodiversidad a largo plazo, dado que las mismas especies probablemente también disminuyan en el límite sur de su distribución, fuera de Gran Bretaña.

Se desarrolló un enfoque metodológico que sirviera para trabajar a cualquier escala espacial, desde la local a la global, pero con el fin de validar la metodología, se implementó a escala nacional, en Gran Bretaña.

### 3. Justificación del enfoque y los métodos

Este enfoque permite identificar a las especies que enfrentan un riesgo futuro ante el cambio climático y aquellas para las que por medio de un uso estratégico de los recursos, se podría facilitar su recuperación o dispersión futura. También considera el balance entre las áreas de disminución y potencial expansión del área de distribución de una especie particular para facilitar la priorización



de las acciones orientadas a reducir pérdida de área y facilitar las expansiones. También se decidió por un enfoque centrado en especies, ya que son ellas, y no las comunidades completas, las que cambian sus distribuciones por el cambio climático (aunque las medidas comunes de conservación pueden satisfacer las necesidades de múltiples especies individuales). La meta de este enfoque es proporcionar una evaluación de riesgo para cada especie que permita desarrollar cualquier acción de conservación, en lugar de solo incorporarla en el enfoque en sí.

El enfoque propuesto por Thomas et al. (2011) (a) incorpora información sobre las tendencias observadas y proyectadas (de manera flexible, utilizando datos de población y/o distribución) para maximizar la información incluida; (b) maneja los datos de hábitat y los de rasgos funcionales (p.ej., dispersión) como límites para evaluar la probabilidad de que ocurran o se exacerbén las proyecciones climáticas; (c) considera la incertidumbre de la evaluación; y (d) proporciona evaluaciones en escalas de tiempo relevantes para el cambio climático y la conservación, con proyecciones a ~100 años (incluso con medidas optimistas de mitigación). Se considera que los datos de rasgos funcionales son modificadores de la respuesta esperada y no impulsores principales de vulnerabilidad, dado que las relaciones entre los rasgos y las respuestas al cambio climático difícilmente serán homogéneas para todos los taxa (p.ej., plantas, invertebrados, vertebrados) a evaluar.

Se usaron datos ya disponibles de modelos correlativos para todas las especies de interés, por lo que los requerimientos de recursos no fue un factor limitante. Los datos de rasgos funcionales necesarios se obtuvieron de estudios previos de las especies. Estos enfoques de población y rasgos pudieron ser combinados sin el alto costo de recursos de tiempo y dinero, como pudo haber sido el caso para otros taxa menos conocidos. La flexibilidad del enfoque (p.ej., al solo utilizar datos de distribución incluidos en modelos) permite realizar evaluaciones aún en regiones y taxa con información limitada, aunque dichas evaluaciones tendrán inevitablemente niveles más bajos de fiabilidad.

Adecuación de los métodos				
	Correlativo	Basado en rasgos	Mecanístico	Combinado
¿Cumple los objetivos?	En parte	En parte	Sí	Sí
¿Existen recursos disponibles?	Sí	Sí	No existían datos suficientes para algunas especies	Sí
¿Se seleccionó?	No	No	No	Sí

Los datos de entrada requeridos para realizar esta evaluación son un tanto distintos a los datos requeridos en evaluaciones de conservación (p.ej., las listas rojas, planes de acción para las especies) lo que permitió que este enfoque fuese utilizado en un periodo razonable aprovechando los datos existentes.

Este enfoque considera al mismo nivel los beneficios y los riesgos al cambio climático. Otras evaluaciones de vulnerabilidad al cambio climático simplemente combinan todas las especies con diferentes niveles de riesgo en una sola categoría de bajo riesgo; sin embargo, el grado en el que una especie se puede beneficiar es potencialmente tan interesante como aquellas que pueden disminuir. Otra ventaja de esta propuesta es que intenta incorporar el nivel de incertidumbre de los resultados, lo que permite que las conclusiones sobre la evaluación de riesgo tengan un nivel de respaldo.

#### 4. Aplicación de los métodos

Se seleccionaron a la mariposa de montaña ojitos (*Erebia epiphron*) y al escarabajo ciervo (*Lucanus cervus*) como las especies para la evaluación debido a sus límites de distribución son opuestos en el área de estudio (norte y sur, respectivamente) y para probar la aplicabilidad del método en diferentes grupos taxonómicos.

El método de este enfoque combina una calificación de disminución (basada en los declives observados y proyectados) con una de aumento (basada en los aumentos observados y proyectados) a fin de obtener una evaluación general de los riesgos potenciales para una especie. Se califica también cada etapa de la evaluación de acuerdo al nivel de confianza de los datos de entrada o en el modelo; y esta calificación se utiliza para ponderar la evaluación con respecto a la información más precisa. La calificación general se convierte en una de las seis categorías de riesgo, de alto beneficio a alto riesgo.

Se aprovecharon los modelos de las distribuciones futuras que ya se han generado para las especies objetivo, así como los datos de distribución/población histórica dentro de Gran Bretaña. Se obtuvieron los cambios de la distribución y población histórica de fuentes publicadas con datos desde 1970 para la mariposa de montaña ojitos (Asher et al., 2001; Fox et al., 2006). La distribución modelada futura se basó en proyecciones para el año 2080 utilizando un escenario de emisiones intermedio (BAMBU – A2, Settele, 2008). Los datos de los cambios poblacionales y de distribución observados de los escarabajos ciervo fueron obtenidos del Enlace de la Red Nacional de Biodiversidad del Reino Unido del periodo 1990-1999 a 2000-2009. La información de las distribuciones futuras se obtuvo de MONARCH, bajo un escenario de bajas emisiones (informe del IPCC SRES, escenario BI) para el 2080 (Walmsley et al., 2007).

Los datos sobre los factores de exacerbación fueron recolectados de varias fuentes, entre otras, publicaciones científicas relevantes, guías de campo específicas de los taxones y consultas con expertos. El tiempo para realizar la evaluación para una sola especie es de aproximadamente una hora, aunque puede ser considerablemente mayor si no se tienen los datos de distribuciones futuras disponibles o si se tienen que organizar reuniones de expertos (las evaluaciones iniciales tardaron un promedio de una especie al día porque el método se encontraba aún en desarrollo).

## 5. Resumen de los resultados

La mariposa de montaña ojitos (*Erebia epiphron*) resultó de alto riesgo por presentar reducciones en el área actual de distribución relacionadas con el clima y con poca oportunidad para la expansión climática. Esto produjo una calificación combinada de alto riesgo ante el cambio climático con un alto nivel de fiabilidad en la evaluación. Como especie montana norteña, la mariposa ojitos tiene poca oportunidad de expandirse fuera de su distribución actual. El alto riesgo a disminuciones relacionadas con el clima en el rango existente (observado y modelado), junto con la falta de área adecuada hacia donde expandirse, sugiere que la mejor estrategia para su conservación sería concentrar los esfuerzos en los lugares existentes para mitigar las pérdidas tanto como se pueda. También se sugiere evaluar el riesgo de las poblaciones europeas de esta especie para determinar si el riesgo es a una extinción regional (Gran Bretaña) o global (es decir, Europa, ya que es endémica continental).

El escarabajo ciervo (*Lucanus cervus*) fue calificado en la categoría de alto beneficio potencial, ya que probablemente se podría expandir considerablemente en Gran Bretaña para el año 2080. La fiabilidad de la evaluación fue menor que para la mariposa, ya que los datos históricos disponibles eran para un periodo más corto, y los datos disponibles en general eran menos completos. Pese a la considerable expansión proyectada en el rango de esta especie, también hay incertidumbre sobre si podría distribuirse en áreas ocupadas por la población humana, lo que disminuye aún más la fiabilidad de la evaluación. La poca fiabilidad resalta la importancia de llevar a cabo un monitoreo continuo de la especie para validar que realmente se logren expansiones en el futuro. De no ser así, se deberían de considerar acciones de conservación (p.ej., establecer conexiones de hábitats) para garantizar lograrlo.

## 6. Resultados para la conservación

Se utilizó este enfoque para evaluar 400 especies en Inglaterra, incluyendo todas las especies de prioridad de la Ley de Medio Ambiente y Comunidades Rurales (NERC, por sus siglas en inglés) en donde se encuentran incluidas especies de gran importancia para la conservación de la biodiversidad en Inglaterra (Pearce-Higgins et al., 2015). Posteriormente, se utilizaron los resultados de esta evaluación para sugerir, cuando era necesario, gestiones para disminuir presiones diferentes al clima y aumentar la resiliencia al cambio ambiental o para aumentar la tasa de expansión de rango.

## 7. Posibles mejoras

El proceso de evaluación depende de la opinión de expertos tanto para identificar las fuentes de datos que son lo suficientemente confiables y sólidas para calcular las tendencias históricas, como para evaluar si existe algún factor de exacerbación específico para la especie. Los resultados de la evaluación y su nivel de fiabilidad también deben ser revisados por expertos con conocimiento de las especies y del cambio climático antes de tomar cualquier decisión de gestión que se basen en ellos.

Una de las fortalezas del método es que combina información de respuestas empíricas y modeladas al cambio climático, y proporciona mayor peso a la información más precisa

(normalmente las tendencias empíricas pasadas, a menos que los resultados de los modelos hayan sido probados con respecto a datos de tendencia empíricos independientes). Las especies evaluadas fueron solo consideradas en escenarios climáticos únicos, y si se consideran múltiples escenarios se reduciría la incertidumbre de las proyecciones futuras; un problema que aplica a cualquier enfoque de evaluación de riesgo. Siempre existirá la incertidumbre del futuro, por lo que se deben realizar adaptaciones al evaluar los resultados (p.ej., considerar la probabilidad de caer en la categoría de más alto riesgo).

Este enfoque actualmente utiliza tasas de disminución lineales con respecto a la población o distribución original, pero de expansión crecientes para el inicio de cada década. Existe la posibilidad de que en un futuro se incluyan métodos alternativos para calcular las disminuciones o expansiones que dependan de la calidad y disponibilidad de los datos.

La escala geográfica del área de evaluación del caso de estudio limita los efectos del cambio climático a una sola dirección sobre las especies consideradas: produce beneficios o pérdidas. Considerando una escala más amplia, se puede esperar que existan áreas en las que las especies experimenten ambos tipos de respuesta. Otro paso importante de validación sería probar cuán bien maneja la evaluación una situación de este tipo.

## 8. Referencias

- Asher, J., Warren, M., Fox, R., Harding, P., Jeffcoate, G. & Jeffcoate, S. 2001. *The Millennium Atlas of Butterflies in Britain and Ireland*. Oxford University Press.
- Fox R.; Asher J.; Brereton T.; Roy D.; Warren M. 2006. *The State of Butterflies in Britain and Ireland*. Pisces Publications, Newbury, UK.
- Pearce-Higgins, J. W., M. A. Ausden, C. M. Beale, T. H. Oliver, and H. Q. P. Crick. 2015. Research on the assessment of risks & opportunities for species in England as a result of climate change.
- Settele, J. 2008. Climatic risk atlas of European butterflies.
- Thomas, C. D., J. K. Hill, B. J. Anderson, S. Bailey, C. M. Beale, R. B. Bradbury, C. R. Bulman, H. Q. P. Crick, F. Eigenbrod, H. M. Griffiths, W. E. Kunin, T. H. Oliver, C. A. Walmsley, K. Watts, N. T. Worsfold, and T. Yardley. 2011. A framework for assessing threats and benefits to species responding to climate change. *Methods in Ecology and Evolution* 2:125–142.
- Walmsley, C.A., Smithers, R.J., Berry, P.M., Harley, M., Stevenson, M.J. & Catchpole, R. E. 2007. Modelling Natural Resource Responses to Climate Change: a Synthesis for Biodiversity Conservation. MONARCH Partnership.

# 11. Referencias

- Advani, N. K. 2014. WWF: Climate Change Vulnerability Assessment for Species. Washington D.C.
- AFWA. 2009. Voluntary Guidance for States to Incorporate Climate Change into State Wildlife Action Plans & Other Management Plans. Washington DC.
- Aiello-Lammens, M. E., R. A. Boria, A. Radosavljevic, B. Vilela, and R. P. Anderson. 2015. spThin: An R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography* **38**:541–545.
- Aiello-Lammens, M. E., M. L. Chu-Agor, M. Convertino, R. A. Fischer, I. Linkov, and R. H. Akçakaya. 2011. The impact of sea-level rise on Snowy Plovers in Florida: integrating geomorphological, habitat, and metapopulation models. *Global Change Biology* **17**:3644–3654.
- Akçakaya, H. R., S. H. M. Butchart, G. M. Mace, S. N. Stuart, and C. Hilton-Taylor. 2006. Use and misuse of the IUCN Red List Criteria in projecting climate change impacts on biodiversity. *Global Change Biology* **12**:2037–2043.
- Akçakaya, H. R., S. H. M. Butchart, J. E. M. Watson, and R. G. Pearson. 2014. Preventing species extinctions resulting from climate change. *Nature Climate Change* **4**:1048–1049.
- Allendorf, F. W., P. A. Hohenlohe, and G. Luikart. 2010. Genomics and the future of conservation genetics. *Nature Reviews Genetics* **11**:697–709.
- Allouche, O., A. Tsoar, and R. Kadmon. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology* **43**:1223–1232.
- Ameca y Juárez, E. I., G. M. Mace, G. Cowlishaw, W. A. Cornforth, and N. Pettorelli. 2013. Assessing exposure to extreme climatic events for terrestrial mammals. *Conservation Letters* **6**:145–153.
- Anacker, B. L., M. Gogol-Prokurat, K. Leidholm, and S. Schoenig. 2013. Climate change vulnerability assessment of rare plants in California. *Madroño* **60**:193–210.
- Anderson, B. J., H. R. Akçakaya, M. B. Araújo, D. A. Fordham, E. Martinez-Meyer, W. Thuiller, and B. W. Brook. 2009. Dynamics of range margins for metapopulations under climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **276**:1415–20.
- Andrade, A., R. Córdoba, R. Dave, P. Giro, B. Herrera-F., R. Munroe, J. Oglethorpe, P. Paaby, E. Pramova, E. Watson, and W. Vergar. 2011. Draft Principles and Guidelines for Integrating Ecosystem-based Approaches to Adaptation in Project and Policy Design. Turrialba, Costa Rica.
- Angert, A. L., L. G. Crozier, L. J. Rissler, S. E. Gilman, J. J. Tewksbury, and A. J. Chuncu. 2011. Do species' traits predict recent shifts at expanding range edges? *Ecology Letters* **14**:677–689.
- Araújo, M. B., D. Alagador, M. Cabeza, D. Nogués-Bravo, and W. Thuiller. 2011. Climate change threatens European conservation areas. *Ecology Letters* **14**:484–92.
- Araújo, M. B., M. Cabeza, W. Thuiller, L. Hannah, and P. H. Williams. 2004. Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods. *Global Change Biology* **10**:1618–1626.
- Araújo, M. B., and A. Guisan. 2006. Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography* **33**:1677–1688.
- Araújo, M. B., and M. Luoto. 2007. The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography* **16**:743–753.
- Araújo, M. B., and M. New. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution* **22**:42–7.
- Araújo, M. B., R. G. Pearson, W. Thuiller, and M. Erhard. 2005. Validation of species–climate impact models under climate change. *Global Change Biology* **11**:1504–1513.
- Araújo, M. B., W. Thuiller, and R. G. Pearson. 2006. Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe. *Journal of Biogeography* **33**:1712–1728.
- Araújo, M., A. T. T. Peterson, M. B. Araújo, and A. T. T. Peterson. 2012. Uses and misuses of bioclimatic envelope modeling. *Ecology* **93**:1527–1539.
- Arponen, A. 2012. Prioritizing species for conservation planning. *Biodiversity and Conservation* **21**:875–893.
- Austin, M. 2007. Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling* **200**:1–19.
- Avolio, M. L., and M. D. Smith. 2013. Intra-specific responses of a dominant C4 grass to altered precipitation patterns. *Plant Ecology* **214**:1377–1389.
- Bagchi, R., M. Crosby, B. Huntley, D. G. Hole, S. H. M. Butchart, Y. Collingham, M. Kalra, J. Rajkumar, A. Rahmani, M. Pandey, H. Gurung, L. T. Trai, N. Van Quang, and S. G. Willis. 2013. Evaluating the effectiveness of conservation site networks under climate change: accounting for uncertainty. *Global Change Biology* **19**:1236–48.
- Bagne, K. E., M. M. Friggens, D. M. Finch, E. Karen, M. Megan, and D. M. A. System. 2011. A System for Assessing Vulnerability of Species (SAVS) to Climate Change. Rocky Mountain Research Station.
- Barbet-Massin, M., W. Thuiller, and F. Jiguet. 2012. The fate of European breeding birds under climate, land-use and dispersal scenarios. *Global Change Biology* **18**:881–890.
- Barnosky, A. D., N. Matzke, S. Tomiya, G. O. U. Wogan, B. Swartz, T. B. Quental, C. Marshall, J. L. McGuire, E. L. Lindsey, K. C. Maguire, B. Mersey, and E. A. Ferrer. 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* **471**:51–57.
- Beale, C. M., M. J. Brewer, and J. J. Lennon. 2014. A new statistical framework for the quantification of covariate associations with species distributions. *Methods in Ecology and Evolution* **5**:421–432.
- Beale, C. M., J. J. Lennon, and A. Gimona. 2008. Opening the climate envelope reveals no macroscale associations with climate in European birds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **105**:14908–12.
- Beaumont, L. J., A. Pitman, S. Perkins, N. E. Zimmermann, and N. G. Yoccoz. 2010. Impacts of climate change on the world's most exceptional ecoregions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108**:2306–2311.
- Beerling, D. J., B. Huntley, and J. P. Bailey. 1995. Climate and the distribution of *Fallopia japonica*. *Journal of Vegetation Science* **6**:269–282.
- Beever, E. A., J. O'Leary, C. Mengelt, J. M. West, S. Julius, N. Green, D. Magness, L. Petes, B. Stein, A. B. Nicotra, J. J. Hellmann, A. L. Robertson, M. D. Staudinger, A. A. Rosenberg, E. Babij, J. Brennan, G. W. Schuurman, and G. E. Hofmann. 2016. Improving Conservation Outcomes with a New Paradigm for Understanding Species' Fundamental and Realized Adaptive Capacity. *Conservation Letters* **9**:131–137.
- Bennie, J., J. A. Hodgson, C. R. Lawson, C. T. R. Holloway, D. B. Roy, T. Brereton, C. D. Thoma, and R. J. Wilson. 2013. Range expansion through fragmented landscapes under a variable climate. *Ecology Letters* **16**:921–929.
- Bennie, J., B. Huntley, A. Wiltshire, M. O. Hill, and R. Baxter. 2008. Slope, aspect and climate: spatially explicit and implicit models of topographic microclimate in chalk grassland. *Ecological Modelling* **216**:47–59.
- Bennie, J. J., A. J. Wiltshire, A. N. Joyce, D. Clark, A. R. Lloyd, J. Adamson, T. Parr, R. Baxter, and B. Huntley. 2010. Characterising inter-annual variation in the spatial pattern of thermal microclimate in a UK upland using a combined empirical–physical model. *Agricultural and Forest Meteorology* **150**:12–19.



- Benscoter, A. M., J. S. Reece, R. F. Noss, L. A. Brandt, F. J. Mazzotti, S. S. Románach, and J. I. Watling. 2013. Threatened and Endangered Subspecies with Vulnerable Ecological Traits Also Have High Susceptibility to Sea Level Rise and Habitat Fragmentation. *PLoS One* **8**:e70647.
- Beresford, A. E., G. M. Buchanan, P. F. Donald, S. H. M. Butchart, L. D. C. Fishpool, and C. Rondinini. 2011. Poor overlap between the distribution of protected areas and globally threatened birds in Africa. *Animal Conservation* **14**:99–107.
- Bled, F., J. D. Nichols, and R. Altwegg. 2013. Dynamic occupancy models for analyzing species' range dynamics across large geographic scales. *Ecology and Evolution* **3**:4896–4909.
- Blois, J. L., J. W. Williams, M. C. Fitzpatrick, S. T. Jackson, and S. Ferrier. 2013. Space can substitute for time in predicting climate-change effects on biodiversity. *Science* **110**:9374–9379.
- Boitani, L., I. Sinibaldi, F. Corsi, A. Biase, I. d'Inzillo Carranza, M. Ravagli, G. Reggiani, C. Rondinini, and P. Trapanese. 2007. Distribution of medium- to large-sized African mammals based on habitat suitability models. *Biodiversity and Conservation* **17**:605–621.
- Both, C., S. Bouwhuis, C. M. Lessells, and M. E. Visser. 2006. Climate change and population declines in a long-distance migratory bird. *Nature* **441**:81–83.
- Bradshaw, W. E., and C. M. Holzapfel. 2006. Evolutionary response to rapid climate change. *Science* **312**:1477–8.
- Breiner, F. T., A. Guisan, A. Bergamini, and M. P. Nobis. 2015. Overcoming limitations of modelling rare species by using ensembles of small models. *Methods in Ecology and Evolution* **6**:1210–1218.
- Buckley, L. B. 2010. The range implications of lizard traits in changing environments. *Global Ecology and Biogeography* **4**:452–464.
- Buckley, L. B., and J. G. Kingsolver. 2012. Functional and phylogenetic approaches to forecasting species' responses to climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **43**:205–226.
- Burgman, M., A. Carr, L. Godden, R. Gregory, M. McBride, L. Flander, and L. Maguire. 2011. Redefining expertise and improving ecological judgment. *Conservation Letters* **4**:81–87.
- Burnham, K. P., and D. R. Anderson. 2002. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. Springer Science & Business Media.
- Busby, J. R. 1991a. BIOCLIM – a bioclimatic analysis and prediction system. Pages 64–68 in C. R. Margules and M. P. Austin, editors. *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*. CSIRO, East Melbourne, Australia.
- Busby, J. R. 1991b. BIOCLIM – a bioclimate analysis and prediction system. Pages 64–68 in C. R. Margules and M. Austin, editors. *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis*. CSIRO, Melbourne.
- Butt, N., H. P. Possingham, C. De Los Rios, R. Maggini, R. A. Fuller, S. L. Maxwell, and J. E. M. Watson. 2016. Challenges in assessing the vulnerability of species to climate change to inform conservation actions. *Biological Conservation* **199**:10–15.
- Campos, P. F., T. Kristensen, L. Orlando, A. Sher, M. V. Kholodova, A. Götherström, M. Hofreiter, D. G. Drucker, P. Kosintsev, A. Tikhonov, G. F. Baryshnikov, E. Willerslev, and M. T. P. Gilbert. 2010. Ancient DNA sequences point to a large loss of mitochondrial genetic diversity in the saiga antelope (*Saiga tatarica*) since the Pleistocene. *Molecular Ecology* **19**:4863–4875.
- Cardillo, M., G. M. Mace, J. L. Gittleman, K. E. Jones, J. Bielby, and A. Purvis. 2008. The predictability of extinction: biological and external correlates of decline in mammals. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society* **275**:1441–8.
- Carpenter, G., A. N. Gillison, and J. Winter. 1993. DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation* **2**:667–680.
- Carr, J. A., W. E. Outhwaite, G. L. Goodman, T. E. E. Oldfield, and W. B. Foden. 2013. *Vital but vulnerable: climate change vulnerability and human use of wildlife in Africa's Albertine Rift*. (IUCN Species Survival Commission, Ed.). IUCN, Gland, Switzerland.
- Caswell, H., C. Barbraud, M. Holland, J. Ströve, and H. Weimerskirch. 2009. Correction for Jenouvrier *et al.*, Demographic models and IPCC climate projections predict the decline of an emperor penguin population. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**:11425–11425.
- Catullo, R. A., S. Ferrier, and A. A. Hoffmann. 2015. Extending spatial modelling of climate change responses beyond the realized niche: estimating, and accommodating, physiological limits and adaptive evolution. *Global Ecology and Biogeography* **24**:1192–1202.
- Cayuela, H., D. Arsovski, J.-M. Thirion, E. Bonnaire, J. Pichenot, S. Boitard, C. Miaud, P. Joly, and A. Besnard. 2016. Demographic responses to weather fluctuations are context dependent in a long-lived amphibian. *Global Change Biology*.
- Ceballos, G., and P. R. Ehrlich. 2002. Mammal population losses and the extinction crisis. *Science* **296**:904–7.
- Chapman, A. D. 2005. *Principles and methods of data cleaning: primary species and species-occurrence data*, Version 1.0. Copenhagen, Denmark.
- Chapman, S., K. Mustin, A. R. Renwick, D. B. Segan, D. G. Hole, R. G. Pearson, and J. E. M. Watson. 2014. Publishing trends on climate change vulnerability in the conservation literature reveal a predominant focus on direct impacts and long time-scales. *Diversity and Distributions* **20**:1221–1228.
- Chen, I.-C., J. K. Hill, R. Ohlemüller, D. B. Roy, and C. D. Thomas. 2011. Rapid range shifts of species of associated with high levels of climate warming. *Science* **333**:1024–1026.
- Chessman, B. C. 2013. Identifying species at risk from climate change: Traits predict the drought vulnerability of freshwater fishes. *Biological Conservation* **160**:40–49.
- Cheung, W. W. L., J. L. Sarmiento, J. Dunne, T. L. Frölicher, V. W. Y. Lam, M. L. Deng Palomares, R. Watson, and D. Pauly. 2012. Shrinking of fishes exacerbates impacts of global ocean changes on marine ecosystems. *Nature Climate Change* **3**:254–258.
- Chevin, L.-M., R. Lande, and G. M. Mace. 2010. Adaptation, plasticity, and extinction in a changing environment: towards a predictive theory. *PLoS Biology* **8**:e1000357.
- Chin, A., P. M. Kyne, T. I. Walker, and R. B. McAuley. 2010. An integrated risk assessment for climate change: analysing the vulnerability of sharks and rays on Australia's Great Barrier Reef. *Global Change Biology* **16**:1936–1953.
- Chown, S. L., A. A. Hoffmann, T. N. Kristensen, M. J. Angilletta, N. C. Stenseth, and C. Pertoldi. 2010. Adapting to climate change: a perspective from evolutionary physiology. *Climate Research* **43**:3–15.
- Christmas, M. J., M. F. Breed, and A. J. Lowe. 2016. Constraints to and conservation implications for climate change adaptation in plants. *Conservation Genetics* **17**:305–320.
- Clauss, M., M. T. Dittmann, D. W. H. Müller, C. Meloro, and D. Codron. 2013. Bergmann's rule in mammals: A cross-species interspecific pattern. *Oikos* **122**:1465–1472.
- Cohen, J. 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement* **XX**:37–46.
- Conrad, K. F., I. P. Woiwod, and J. N. Perry. 2003. East Atlantic teleconnection pattern and the decline of a common arctiid moth. *Global Change Biology* **9**:125–130.
- Cross, M. S., P. D. McCarthy, G. Garfin, D. Gori, and C. A. F. Enquist. 2013. Accelerating Adaptation of Natural Resource Management to Address Climate Change. *Conservation Biology* **27**:4–13.

- Cross, M. S., E. S. Zavaleta, D. Bachelet, M. L. Brooks, C. A. F. Enquist, E. Fleishman, L. J. Graumlich, C. R. Groves, L. Hannah, L. Hansen, G. Hayward, M. Koopman, J. J. Lawler, J. Malcolm, J. Nordgren, B. Petersen, E. L. Rowland, D. Scott, S. L. Shafer, M. R. Shaw, and G. M. Tabor. 2012. The Adaptation for Conservation Targets (ACT) Framework: A Tool for Incorporating Climate Change into Natural Resource Management. *Environmental Management* 50:341–3Crozier, L. G., R. W. Zabel, and A. F. Hamlet. 2008. Predicting differential effects of climate change at the population level with life-cycle models of spring Chinook salmon. *Global Change Biology* 14:236–249.
- Cruz, M. J., E. M. R. Robert, T. Costa, D. Avelar, R. Rebelo, and M. Pulquerio. 2015. Assessing biodiversity vulnerability to climate change: testing different methodologies for Portuguese herpetofauna. *Regional Environmental Change* 16:1293–1304.
- Daly, C., W. P. Gibson, G. H. Taylor, G. L. Johnson, and P. Pasteris. 2002. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate. *Climate Research* 22:99–113.
- Damschen, E. I., S. Harrison, and J. B. Grace. 2010. Climate change effects on an endemic-rich edaphic flora: resurveying Robert H. Whittaker's Siskiyou sites (Oregon, USA). *Ecology* 91:3609–3619.
- Dawson, T. P., S. T. Jackson, J. I. House, I. C. Prentice, and G. M. Mace. 2011. Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science* 332:53–58.
- De'ath, G., and K. E. Fabricius. 2000. Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology* 81:3178–3192.
- Delean, S., C. M. Bull, B. W. Brook, L. M. B. Heard, and D. A. Fordham. 2013. Using plant distributions to predict the current and future range of a rare lizard. *Diversity and Distributions* 19:1125–1137.
- Deutsch, C. A., J. J. Tewksbury, R. B. Huey, K. S. Sheldon, C. K. Ghalambor, D. C. Haak, and P. R. Martin. 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105:6668–6672.
- Devictor, V., R. Julliard, D. Couvet, and F. Jiguet. 2008. Birds are tracking climate warming, but not fast enough. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 275:2743–8.
- Devictor, V., C. van Swaay, T. Brereton, L. Brotons, D. Chamberlain, J. Heliölä, S. Herrando, R. Julliard, M. Kuussaari, Å. Lindström, J. Reif, D. B. Roy, O. Schweiger, J. Settele, C. Stefanescu, A. Van Strien, C. Van Turnhout, Z. Vermouzek, M. WallisDeVries, I. Wynhoff, and F. Jiguet. 2012. Differences in the climatic debts of birds and butterflies at a continental scale. *Nature Climate Change* 2:121–124.
- Dobrowski, S. Z., J. H. Thorne, and J. A. Greenberg. 2011. Modeling plant ranges over 75 years of climate change in California, USA: temporal transferability and species traits. *Ecological Monographs* 81:241–257.
- Dormann, C. F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, G. Carl, G. Carré, J. R. G. Marquéz, B. Gruber, B. Lafourcade, P. J. Leitão, T. Münkemüller, C. McClean, P. E. Osborne, B. Reineking, B. Schröder, A. K. Skidmore, D. Zurell, and S. Lautenbach. 2013. Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36:027–046.
- Dubois, N., A. Caldas, J. Boshoven, A. Delach, and J. R. Clark. 2011. Integrating climate change vulnerability assessments into adaptation planning. Wildlife Conservation. Washington D.C.
- Edwards, C. E. 2015. Looking to the future of conservation genetics: The case for using quantitative genetic experiments to estimate the ability of rare plants to withstand climate change. *American Journal of Botany* 102:1011–1013.
- Ehrlich, P. R., and R. M. Pringle. 2008. Where does biodiversity go from here? A grim business-as-usual forecast and a hopeful portfolio of partial solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105:11579–86.
- Elith, J., C. H. Graham, R. P. Anderson, M. Dudík, S. Ferrier, A. Guisan, R. J. Hijmans, F. Huettmann, J. R. Leathwick, A. Lehmann, J. Li, L. G. Lohmann, B. A. Loiselle, G. Manion, C. Moritz, M. Nakamura, Y. Nakazawa, J. M. Overton, A. Townsend Peterson, S. J. Phillips, K. Richardson, R. Scachetti-Pereira, R. E. Schapire, J. Soberón, S. Williams, M. S. Wisz, and N. E. Zimmermann. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29:129–151.
- Elith, J., M. Kearney, and S. Phillips. 2010. The art of modelling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution* 1:330–342.
- Ellegren, H. 2014. Genome sequencing and population genomics in non-model organisms. *Trends in Ecology and Evolution* 29:51–63.
- Estrada, A., C. Meireles, I. Morales-Castilla, P. Poschod, D. Vieites, M. B. Araújo, and R. Early. 2015. Species' intrinsic traits inform their range limitations and vulnerability under environmental change. *Global Ecology and Biogeography* 24:849–858.
- Estrada, A., I. Morales-castilla, P. Caplat, and R. Early. 2016. Usefulness of Species Traits in Predicting Range Shifts. *Trends in Ecology & Evolution* 20145:1–14.
- Etterson, J. R., and R. G. Shaw. 2001. Constraint to adaptive evolution in response to global warming. *Science* 294:151–154.
- Feeley, K. J., and M. R. Silman. 2011. The data void in modeling current and future distributions of tropical species. *Global Change Biology* 17:626–630.
- Ferrier, S., and A. Guisan. 2006. Spatial modelling of biodiversity at the community level. *Journal of Applied Ecology* 43:393–404.
- Fischlin, A., G. F. Midgley, J. Price, R. Leemans, B. Gopal, C. Turley, M. D. A. Rounsevell, O. P. Dube, A. A. Tarazona, and A. A. Velichko. 2007. Ecosystems, their properties, goods and services. Pages 211–272 in M. L. Parry, M. L. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, and C. E. Hanson, editors. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Fitzpatrick, M. C., and W. W. Hargrove. 2009. The projection of species distribution models and the problem of non-analog climate. *Biodiversity and Conservation* 18:2255–2261.
- Flockhart, D. T. T., J.-B. Pichancourt, D. R. Norris, and T. G. Martin. 2015. Unravelling the annual cycle in a migratory animal: breeding-season habitat loss drives population declines of monarch butterflies. *Journal of Animal Ecology* 84:155–165.
- Foden, W. B., S. H. M. Butchart, S. N. Stuart, J.-C. Vié, H. R. Akçakaya, A. Angulo, L. M. DeVantier, A. Gutsche, E. Turak, L. Cao, S. D. Donner, V. Katariya, R. Bernard, R. A. Holland, A. F. Hughes, S. E. O'Hanlon, S. T. Garnett, Ç. H. Şekercioğlu, and G. M. Mace. 2013. Identifying the World's Most Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians and Corals. *PLoS One* 8:e65427.
- Foden, W., G. F. Midgley, G. Hughes, W. J. Bond, W. Thuiller, M. T. Hoffman, P. Kaleme, L. G. Underhill, A. Rebelo, and L. Hannah. 2007. A changing climate is eroding the geographical range of the Namib Desert tree *Aloe* through population declines and dispersal lags. *Diversity and Distributions* 13:645–653.
- Folland, C., T. Karl, J. Christy, R. A. Clarke, G. V. Gruza, J. Jouzel, M. E. Mann, J. Oerlemans, M. J. Salinger, and S. W. Wang. 2001. Observed Climate Variability and Change. Pages 99–181 in H. JT, G. D. Ding Y, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. Johnson, editors. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Fordham, D. A., H. R. Akçakaya, B. W. Brook, A. Rodríguez, P. C. Alves, E. Civantos, M. Triviño, M. J. Watts, and M. B. Araújo. 2013a. Adapted conservation measures are required to save the Iberian lynx in a changing climate. *Nature Climate Change* 3:899–903.

- Fordham, D. A., C. Mellin, B. D. Russell, H. R. Akçakaya, C. J. A. Bradshaw, M. E. Aiello-Lammens, M. J. Caley, S. D. Connell, S. Mayfield, S. A. Shepherd, and B. W. Brook. 2013b. Population dynamics can be more important than physiological limits for determining range shifts under climate change. *Global Change Biology* 3224–3238.
- Forrest, J. L., E. Wikramanayake, R. Shrestha, G. Areendran, K. Gyeltshen, A. Maheshwari, S. Mazumdar, R. Naidoo, G. J. Thapa, and K. Thapa. 2012. Conservation and climate change: Assessing the vulnerability of snow leopard habitat to treeline shift in the Himalaya. *Biological Conservation* 150:129–135.
- Fox, R., T. H. Oliver, C. Harrower, M. S. Parsons, C. D. Thomas, and D. B. Roy. 2014. Long-term changes to the frequency of occurrence of British moths are consistent with opposing and synergistic effects of climate and land-use changes. *Journal of Applied Ecology* 51:949–957.
- Franklin, J. 2013. Species distribution models in conservation biogeography: developments and challenges. *Diversity and Distributions* 19:1217–1223.
- Fraser, W. R., W. Z. Trivelpiece, D. G. Ainley, and S. G. Trivelpiece. 1992. Increases in Antarctic penguin populations: reduced competition with whales or a loss of sea ice due to environmental warming? *Polar Biology* 11:525–531.
- Freckleton, R. P., P. H. Harvey, and M. Pagel. 2003. Bergmann's Rule and Body Size in Mammals. *The American Naturalist* 161:821–825.
- De Frenne, P., F. Rodríguez-Sánchez, D. A. Coomes, L. Baeten, G. Verstraeten, M. Vellend, M. Bernhardt-Römermann, C. D. Brown, J. Brunet, J. Cornelis, G. M. Decocq, H. Dierschke, O. Eriksson, F. S. Gilliam, R. Hédli, T. Heinken, M. Hermy, P. Hommel, M. a Jenkins, D. L. Kelly, K. J. Kirby, F. J. G. Mitchell, T. Naaf, M. Newman, G. Peterken, P. Petrik, J. Schultz, G. Sonnier, H. Van Calster, D. M. Waller, G.-R. Walther, P. S. White, K. D. Woods, M. Wulf, B. J. Graae, and K. Verheyen. 2013. Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110:18561–5.
- Funk, C. C., P. J. Peterson, M. F. Landsfeld, D. H. Pedreros, J. P. Verdin, J. D. Rowland, B. E. Romero, G. J. Husak, J. C. Michaelsen, and A. P. Verdin. 2014. A Quasi-Global Precipitation Time Series for Drought Monitoring. *US Geological Survey Data Series* 832:4.
- Game, E. T., P. Kareiva, and H. P. Possingham. 2013. Six common mistakes in conservation priority setting. *Conservation Biology* 27:480–5.
- García, R. A., M. B. Araújo, N. D. Burgess, W. B. Foden, A. Gutsche, C. Rahbek, and M. Cabeza. 2014a. Matching species traits to projected threats and opportunities from climate change. *Journal of Biogeography* 41:724–735.
- García, R. A., N. D. Burgess, M. Cabeza, C. Rahbek, and M. B. Araújo. 2012. Exploring consensus in 21st century projections of climatically suitable areas for African vertebrates. *Global Change Biology* 18:1253–1269.
- García, R. A., M. Cabeza, C. Rahbek, and M. B. Araújo. 2014b. Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science* 344:1247579.
- Gardali, T., N. E. Seavy, R. T. DiGaudio, and L. A. Comrack. 2012. A climate change vulnerability assessment of California's at-risk birds. *PloS One* 7:e29507.
- Garnett, S., D. Franklin, G. Ehmke, J. Vanderwal, L. Hodgson, C. Pavey, A. Reside, J. Welbergen, S. Butchart, G. Perkins, and S. Williams. 2013. *Climate change adaptation strategies for Australian birds*. Gold Coast.
- Gaston, K. J. 2000. Global patterns in biodiversity. *Nature* 405:220–227.
- Gillingham, P. K., B. Huntley, W. E. Kunin, and C. D. Thomas. 2012a. The effect of spatial resolution on projected responses to climate warming. *Diversity and Distributions* 18:990–1000.
- Gillingham, P. K., S. C. F. Palmer, B. Huntley, W. E. Kunin, J. D. Chipperfi, and C. D. Thomas. 2012b. The relative importance of climate and habitat in determining the distributions of species at different spatial scales: a case study with ground beetles in Great Britain. *Ecography* 35:831–838.
- Glick, P., B. A. Stein, and N. A. Edelson. 2011. *Scanning the conservation horizon: a guide to climate change vulnerability assessment*. Scanning. National Wildlife Federation, Washington D.C.
- Golicher, D. J., L. Cayuela, J. R. M. Alkemade, M. González-Espinosa, and N. Ramírez-Marcial. 2008. Applying climatically associated species pools to the modelling of compositional change in tropical montane forests. *Global Ecology and Biogeography* 17:262–273.
- González-Suárez, M., P. M. Lucas, and E. Revilla. 2012. Biases in comparative analyses of extinction risk: mind the gap. *Journal of Animal Ecology* 81:1211–1222.
- Gordon, C., C. Cooper, C. A. Senior, H. Banks, J. M. Gregory, T. C. Johns, and R. A. Wood. 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics* 16:147–168.
- Graham, N. A. J., P. Chabanet, R. D. Evans, S. Jennings, Y. Letourneur, M. Aaron Macneil, T. R. McClanahan, M. C. Ohman, N. V. C. Polunin, and S. K. Wilson. 2011. Extinction vulnerability of coral reef fishes. *Ecology Letters* 14:341–8.
- Graham, R., E. Lundelius, M. Graham, E. Schroeder, R. Toomey, E. Anderson, A. Barnosky, J. Burns, C. Churcher, D. Grayson, R. Guthrie, C. Harington, G. Jefferson, L. Martin, H. McDonald, R. Morlan, H. Semken, S. Webb, L. Werdelin, and M. Wilson. 1996. Spatial response of mammals to late Quaternary environmental fluctuations. *Science* 272:1601–6.
- Green, R. E., Y. C. Collingham, S. G. Willis, R. D. Gregory, K. W. Smith, and B. Huntley. 2008. Performance of climate envelope models in retrodicting recent changes in bird population size from observed climatic change. *Biology Letters* 4:599–602.
- Gregory, R. D., S. G. Willis, F. Jiguet, P. Vorisek, A. Klvánová, A. van Strien, B. Huntley, Y. C. Collingham, D. Couvet, and R. E. Green. 2009. An indicator of the impact of climatic change on European bird populations. *PloS One* 4:e4678.
- Gross, J., S. Woodley, L. Welling, and J. Watson. 2016. *Responding to Climate Change: Guidance for Protected Area Managers and Planners*. IUCN, Gland, Switzerland.
- Groves, C., M. Anderson, E. Girvetz, T. Sandwith, L. Schwarz, and R. Shaw. 2010. *Climate Change and Conservation: A Primer for Assessing Impacts and Advancing Ecosystem-based Adaptation in The Nature Conservancy*. Arlington, Virginia.
- Guillera-Aroita, G., J. J. Lahoz-Monfort, J. Elith, A. Gordon, H. Kujala, P. E. Lentini, M. A. McCarthy, R. Tingley, and B. A. Wintle. 2015. Is my species distribution model fit for purpose? Matching data and models to applications. *Global Ecology and Biogeography* 24:276–292.
- Guisan, A., and W. Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8:993–1009.
- Hagemeijer, E., and M. Blair. 1997. *The EBCC Atlas of European Breeding Birds: Their distribution and abundance*. (E. Hagemeijer and M. Blair, Eds.). T. & A.D. Poyser, London.
- Hällfors, M. H., J. Liao, J. Dzurisin, R. Grundel, M. Hyvärinen, K. Towle, G. C. Wu, and J. J. Hellmann. 2016. Addressing potential local adaptation in species distribution models: implications for conservation under climate change. *Ecological Applications* 26:1154–1169.
- Hannah, L., M. Ikegami, D. G. Hole, C. Seo, S. H. M. Butchart, A. Townsend, and P. R. Roehrdanz. 2013. Global Climate Change Adaptation Priorities for Biodiversity and Food Security. *PloS One* 8:e27590.
- Hannah, L., G. F. Midgley, T. Lovejoy, W. J. Bond, M. Bush, J. C. Lovett, D. Scott, and F. I. Woodward. 2002. Conservation of Biodiversity in a Changing Climate. *Conservation Biology* 16:264–268.
- Hardwick, S. R., R. Toumi, M. Pfeifer, E. C. Turner, R. Nilus, and R. M. Ewers. 2015. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology* 201:187–195.



- Hare, J. A., W. E. Morrison, M. W. Nelson, M. M. Stachura, J. Teeters, R. B. Griffis, M. A. Alexander, J. D. Scott, L. Alade, R. J. Bell, A. S. Chute, K. L. Curti, T. H. Curtis, D. Kircheis, J. F. Kocik, S. M. Lucey, C. T. Mccandless, L. M. Milke, E. Richardson, E. Robillard, H. J. Walsh, and M. C. Mcmanus. 2016. A Vulnerability Assessment of Fish and Invertebrates to Climate Change on the Northeast US Continental Shelf. *PLoS One* **11**:e0146756.
- Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn, and D. H. Lister. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology* **34**:623–642.
- Harris, J. B. C., D. A. Fordham, P. A. Mooney, L. P. Pedler, M. B. Araújo, D. C. Paton, M. G. Stead, M. J. Watts, R. H. Akçakaya, and B. W. Brook. 2012. Managing the long-term persistence of a rare cockatoo under climate change. *Journal of Applied Ecology* **49**:785–794.
- Harrison, J. A., D. G. Allan, L. G. Underhill, M. Herremans, A. J. Tree, V. Parker, and C. J. Brown. 1997. The Atlas of Southern African Birds. (J. A. Harrison, D. G. Allan, L. G. Underhill, M. Herremans, A. J. Tree, V. Parker, and C. J. Brown, Eds.). BirdLife South Africa.
- Hazzah, L., S. Dolrenry, D. Kaplan, and L. Frank. 2013. The influence of park access during drought on attitudes toward wildlife and lion killing behaviour in Maasailand, Kenya. *Environmental Conservation* **40**:266–276.
- Hedrick, P. W., and R. Fredrickson. 2010. Genetic rescue guidelines with examples from Mexican wolves and Florida panthers. *Conservation Genetics* **11**:615–626.
- Heikkinen, R. K., M. Luoto, M. B. Araújo, R. Virkkala, W. Thuiller, and M. T. Sykes. 2006. Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography* **30**:751–777.
- Herman, T. B., and F. W. Scott. 1994. Protected areas and global climate change: assessing the regional or local vulnerability of vertebrate species. Page 104 in J. Pernetta, R. Leemans, D. Elder, and S. Humphrey, editors. Impacts of biodiversity on ecosystems and species: implications for protected areas. IUCN, Gland, Switzerland.
- Hespenheide, H. 1973. Ecological Inferences from Morphological Data. *Annual Review of Ecology and Systematics* **4**:213–229.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones, and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**:1965–1978.
- Hill, J. K., C. D. Thomas, B. Huntley, J. K. Hill, C. D. Thomas, and B. Huntley. 1999. Climate and habitat availability determine 20th century changes in a butterfly's range margin. *Proc. R. Soc. Lond.* **266**:1197–1206.
- Hinkel, J. 2011. “Indicators of vulnerability and adaptive capacity”: Towards a clarification of the science–policy interface. *Global Environmental Change* **21**:198–208.
- Hodgson, J. A., J. J. Bennie, G. Dale, N. Longley, R. J. Wilson, and C. D. Thomas. 2015. Predicting microscale shifts in the distribution of the butterfly *Plebejus argus* at the northern edge of its range. *Ecography* **38**:998–1005.
- Hof, C., M. B. Araújo, W. Jetz, and C. Rahbek. 2011. Additive threats from pathogens, climate and land-use change for global amphibian diversity. *Nature* **480**:516–519.
- Hoffmann, A., P. Griffin, S. Dillon, R. Catullo, R. Rane, M. Byrne, R. Jordan, J. Oakeshott, A. Weeks, L. Joseph, P. Lockhart, J. Borevitz, and C. Sgrò. 2015. A framework for incorporating evolutionary genomics into biodiversity conservation and management. *Climate Change Responses* **2**:1–23.
- Hoffmann, M., T. M. Brooks, S. H. M. Butchart, K. E. Carpenter, J. Chanson, V. Katariya, C. M. Pollock, S. Quader, N. I. Richman, A. S. L. Rodrigues, T. J. Papenfuss, G. Parra-olea, W. F. Perrin, B. A. Polidoro, R. P. Reynolds, A. G. J. Rhodin, S. J. Richards, L. O. Rodríguez, C. Self-sullivan, Y. Shi, A. Shoemaker, F. T. Short, J. Snoeks, A. J. Stattersfield, A. J. Symes, A. B. Taber, K. Tsytulina, D. Tweddle, C. Ubeda, S. V Valenti, J. A. McNeely, R. A. Mittermeier, G. M. Reid, B. A. Stein, and S. N. Stuart. 2010. The impact of conservation on the status of the world's vertebrates. *Science* **330**:1503–1509.
- Hole, D. G., S. G. Willis, D. J. Pain, L. D. Fishpool, S. H. M. Butchart, Y. C. Collingham, C. Rahbek, and B. Huntley. 2009. Projected impacts of climate change on a continent-wide protected area network. *Ecology Letters* **12**:420–31.
- Huey, R. B., M. R. Kearney, A. Krockenberger, J. A. M. Holtum, M. Jess, and S. E. Williams. 2012. Predicting organismal vulnerability to climate warming: roles of behaviour, physiology and adaptation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences* **367**:1665–79.
- Hunter, C. M., H. Caswell, M. C. Runge, E. V Regehr, C. Steve, I. Stirling, and S. Url. 2010. Climate change threatens polar bear populations: a stochastic demographic analysis. *Ecology* **91**:2883–2897.
- Huntley, B. 1990. Dissimilarity mapping between fossil and contemporary spectra in Europe for the past 13,000 years. *Quaternary Research* **33**:360–376.
- Huntley, B. 2001. Reconstructing past environments from the Quaternary palaeovegetation record. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy* **101B**:3–18.
- Huntley, B. 2012. Reconstructing palaeoclimates from biological proxies: some often overlooked sources of uncertainty. *Quaternary Science Reviews* **31**:1–16.
- Huntley, B., R. Altwegg, P. Barnard, Y. C. Collingham, and D. G. Hole. 2012. Modelling relationships between species spatial abundance patterns and climate. *Global Ecology and Biogeography* **21**:668–681.
- Huntley, B., P. M. Berry, W. Cramer, and A. P. McDonald. 1995. Modelling Present and Potential Future Ranges of Some European Higher Plants Using Climate Response Surfaces. *Journal of Biogeography* **22**:967–1001.
- Huntley, B., Y. C. Collingham, R. E. Green, G. M. Hilton, C. Rahbek, and S. G. Willis. 2006. Potential impacts of climatic change upon geographical distributions of birds. *Ibis* **148**:8–28.
- Huntley, B., Y. C. Collingham, S. G. Willis, and R. E. Green. 2008. Potential impacts of climatic change on European breeding birds. *PLoS One* **3**:e1439.
- Huntley, B., R. Green, Y. Collingham, and S. Willis. 2007. *A climatic atlas of European breeding birds*. Lynx Edicions, Barcelona.
- Huntley, B., G. F. Midgley, P. Barnard, and P. J. Valdes. 2014. Suborbital climatic variability and centres of biological diversity in the Cape region of southern Africa. *Journal of Biogeography* **41**:1338–1351.
- Huntley, B., and T. Webb. 1989. Migration: Species' Response to Climatic Variations Caused by Changes in the Earth's Orbit. *Journal of Biogeography* **16**:5.
- Hurt, G. C., L. P. Chini, S. Frolking, R. A. Betts, J. Feddema, G. Fischer, J. P. Fisk, K. Hibbard, R. A. Houghton, A. Janetos, C. D. Jones, G. Kindermann, T. Kinoshita, K. Klein Goldewijk, K. Riahi, E. Shevliakova, S. Smith, E. Stehfest, A. Thomson, P. Thornton, D. P. van Vuuren, and Y. P. Wang. 2011. Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change* **109**:117–161.
- Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remark. *Cold Spring Harbour Symposium on Quantitative Biology* **22**:415–457.
- Ionescu, C., R. J. T. Klein, J. Hinkel, K. S. K. Kumar, and R. Klein. 2009. Towards a formal framework of vulnerability to climate change. *Environmental Modelling and Assessment* **14**:1–16.

- IPCC. 2007a. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. (P. J. van der L. and C. E. H. M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, Ed.). Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2007b. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, Eds.). Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2013a. Summary for Policymakers. Pages 1–28 in T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley, editors. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- IPCC. 2013b. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- IPCC. 2014. Summary for Policymakers. Pages 1–32 in C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White, editors. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Contributions of the Working Group II to the Fifth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Isaac, J. L. 2009. Effects of climate change on life history: implications for extinction risk in mammals. *Endangered Species Research* 7:115–123.
- IUCN. 2014. Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 11. Prepared by the Standards and Petitions Subcommittee. Downloadable from <http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>.
- IUCN. 2015. The IUCN Red List of Threatened Species: Summary Statistics. [http://www.iucnredlist.org/about/summary-statistics#Tables\\_1\\_2](http://www.iucnredlist.org/about/summary-statistics#Tables_1_2).
- IUCN SSC Standards and Petitions Subcommittee. 2016. *Guidelines for using the IUCN Red List Categories and Criteria*. Version 12. Prepared by the Standards and Petitions Subcommittee of the IUCN Species Survival Commission. IUCN, Gland, Switzerland.
- IUCN/SSC. 2008. *Strategic Planning for Species Conservation: A Handbook*. Version 1. IUCN Species Survival Commission, Gland, Switzerland.
- Jackson, S. T., and J. W. Williams. 2004. Modern analogues in Quaternary paleoecology: here today, gone yesterday, gone tomorrow? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 32:495–537.
- Jalas, J., and J. Suominen. 1972. Atlas Florae Europaeae. (J. Jalas and J. Suominen, Eds.). Societas Biologica Fennica Vanamo, Helsinki.
- Jenouvrier, S., H. Caswell, C. Barbraud, M. Holland, J. Stroeve, and H. Weimerskirch. 2009. Demographic models and IPCC climate projections predict the decline of an emperor penguin population. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106:1844–1847.
- Jiguet, F., A.-S. Gadot, R. Julliard, S. E. Newson, and D. Couvet. 2007. Climate envelope, life history traits and the resilience of birds facing global change. *Global Change Biology* 13:1672–1684.
- Johnson, K. A. 2014. Climate Change Vulnerability Assessment for Natural Resources Management: Toolbox of Methods with Case Studies. Arlington, Virginia.
- Johnston, A., M. Ausden, A. M. Dodd, R. B. Bradbury, D. E. Chamberlain, F. Jiguet, C. D. Thomas, A. S. C. P. Cook, S. E. Newson, N. Ockendon, M. M. Rehfish, S. Roos, C. B. Thaxter, A. Brown, H. Q. P. Crick, A. Douse, R. A. McCall, H. Pontier, D. A. Stroud, B. Cadiou, O. Crowe, B. Deceuninck, M. Hornman, and Pearce-Higgins. James. 2013. Observed and predicted effects of climate change on species abundance in protected areas. *Nature Climate Change* 3:1055–1061.
- Johnston, A., C. B. Thaxter, G. E. Austin, A. S. C. P. Cook, E. M. Humphreys, D. A. Still, A. Mackay, R. Irvine, A. Webb, and N. H. K. Burton. 2015. Modelling the abundance and distribution of marine birds accounting for uncertain species identification. *Journal of Applied Ecology* 52:150–160.
- Jones, H. P., D. G. Hole, and E. S. Zavaleta. 2012. Harnessing nature to help people adapt to climate change. *Nature Climate Change* 2:504–509.
- Joppa, L. N., B. O'Connor, P. Visconti, C. Smith, J. Geldmann, M. Hoffmann, J. E. M. Watson, S. H. M. Butchart, M. V.- Sawmy, B. S. Halpern, S. E. Ahmed, A. Balmford, W. J. Sutherland, M. Harfoot, C. Hilton-Taylor, W. Foden, E. Di Minin, S. Pagad, and N. D. Burgess. 2016. Filling in biodiversity threat gaps. *Science* 352:416–418.
- Kearney, M., B. L. Phillips, C. R. Tracy, K. A. Christian, G. Betts, and W. P. Porter. 2008. Modelling species distributions without using species distributions: the cane toad in Australia under current and future climates. *Ecography* 31:423–434.
- Kearney, M., and W. Porter. 2009. Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology Letters* 12:334–350.
- Keith, D. A., H. R. Akçakaya, W. Thuiller, G. F. Midgley, R. G. Pearson, S. J. Phillips, H. M. Regan, M. B. Araújo, and T. G. Rebelo. 2008. Predicting extinction risks under climate change: coupling stochastic population models with dynamic bioclimatic habitat models. *Biology Letters* 4:560–563.
- Keith, D. A., M. Mahony, H. Hines, J. Elith, T. J. Regan, J. B. Baumgartner, D. Hunter, G. W. Heard, N. J. Mitchell, K. M. Parris, T. Penman, B. Scheele, C. C. Simpson, R. Tingley, C. R. Tracy, M. West, and H. R. Akçakaya. 2014. Detecting Extinction Risk from Climate Change by IUCN Red List Criteria. *Conservation Biology* 28:810–819.
- Kharouba, H. M., A. C. Algar, and J. T. Kerr. 2009. Historically calibrated predictions of butterfly species' range shift using global change as a pseudo-experiment. *Ecology* 90:2213–2222.
- Laidre, K. L., I. Stirling, L. F. Lowry, O. Wiig, M. P. Heide-Jørgensen, and S. H. Ferguson. 2008. Quantifying the sensitivity of Arctic marine mammals to climate-induced habitat change. *Ecological Applications* 18:S97–S125.
- Laurance, W. F., D. C. Useche, J. Rendeiro, M. Kalka, C. J. a Bradshaw, S. P. Sloan, S. G. Laurance, M. Campbell, K. Abernethy, P. Alvarez, V. Arroyo-Rodriguez, P. Ashton, J. Benítez-Malvido, A. Blom, K. S. Bobo, C. H. Cannon, M. Cao, R. Carroll, C. Chapman, R. Coates, M. Cords, F. Danielsen, B. De Dijn, E. Dinerstein, M. a Donnelly, D. Edwards, F. Edwards, N. Farwig, P. Fashing, P.-M. Forget, M. Foster, G. Gale, D. Harris, R. Harrison, J. Hart, S. Karpanty, W. J. Kress, J. Krishnaswamy, W. Logsdon, J. Lovett, W. Magnusson, F. Maisels, A. R. Marshall, D. McClearn, D. Mudappa, M. R. Nielsen, R. Pearson, N. Pitman, J. van der Ploeg, A. Plumptre, J. Poulsen, M. Quesada, H. Rainey, D. Robinson, C. Roetgers, F. Rovero, F. Scatena, C. Schulze, D. Sheil, T. Struhsaker, J. Terborgh, D. Thomas, R. Timm, J. N. Urbina-Cardona, K. Vasudevan, S. J. Wright, J. C. Arias-G, L. Arroyo, M. Ashton, P. Auzel, D. Babaasa, F. Babweteera, P. Baker, O. Banki, M. Bass, I. Bila-Isia, S. Blake, W. Brockelman, N. Brokaw, C. a Brühl, S. Bunyavechewin, J.-T. Chao, J. Chave, R. Chellam, C. J. Clark, J. Clavijo, R. Congdon, R. Corlett, H. S. Dattaraja, C. Dave, G. Davies, B. D. M. Beisiegel, R. D. N. P. da Silva, A. Di Fiore, A. Diesmos, R. Dirzo, D. Doran-Sheehy, M. Eaton, L. Emmons, A. Estrada, C. Ewango, L. Fedigan, F. Feer, B. Fruth, J. G. Willis, U. Goodale, S. Goodman, J. C. Guix, P. Guthiga, W. Haber, K. Hamer, I. Herlinger, J. Hill, Z. Huang, I. F. Sun, K. Ickes, A. Itoh, N. Ivanauskas, B. Jackes, J. Janovec, D. Janzen, M. Jiangming, C. Jin, T. Jones, H. Justiniano, E. Kalka, A. Kasangaki, T. Killeen, H. King, E. Klop, C. Knott, I. Koné, E. Kudavidanage, J. L. D. S. Ribeiro, J. Lattke, R. Laval, R. Lawton, M. Leal, M. Leighton, M. Lentino, C. Leonel, J. Lindsell, L. Ling-Ling, K. E. Linsenmair, E. Losos, A. Lugo, J. Lwanga, A. L. Mack, M. Martins, W. S. McGraw, R. McNab, L. Montag, J. M. Thompson, J. Nabe-Nielsen, M. Nakagawa, S. Nepal, M. Norconk, V. Novotny, S.

- O'Donnell, M. Opiang, P. Ouboter, K. Parker, N. Parthasarathy, K. Pisciotto, D. Prawiradilaga, C. Pringle, S. Rajathurai, U. Reichard, G. Reinartz, K. Renton, G. Reynolds, V. Reynolds, E. Riley, M.-O. Rödel, J. Rothman, P. Round, S. Sakai, T. Sanaïotti, T. Savini, G. Schaab, J. Seidensticker, A. Siaka, M. R. Silman, T. B. Smith, S. S. de Almeida, N. Sodhi, C. Stanford, K. Stewart, E. Stokes, K. E. Stoner, R. Sukumar, M. Surbeck, M. Tobler, T. Tscharnkte, A. Turkalo, G. Umapathy, M. van Weerd, J. V. Rivera, M. Venkataraman, L. Venn, C. Verec, C. V. de Castilho, M. Waltert, B. Wang, D. Watts, W. Weber, P. West, D. Whitacre, K. Whitney, D. Wilkie, S. Williams, D. D. Wright, P. Wright, L. Xiankai, P. Yonzon, and F. Zamzani. 2012. Averting biodiversity collapse in tropical forest protected areas. *Nature* **489**:290–4.
- Lawing, A. M., and P. D. Polly. 2011. Pleistocene climate, phylogeny, and climate envelope models: an integrative approach to better understand species' response to climate change. *PLoS One* **6**:e28554.
- Lehmann, J., and M. Rillig. 2014a. Distinguishing variability from uncertainty. *Nature Climate Change* **4**:153.
- Lehmann, J., and M. Rillig. 2014b. Distinguishing variability from uncertainty. *Nature Climate Change* **4**:153–153.
- Leroux, S. J., M. Larrière, V. Boucher-Lalonde, A. Hurford, J. Zuloaga, J. T. Kerr, and F. Lutscher. 2013. Mechanistic models for the spatial spread of species under climate change. *Ecological Applications* **23**:815–28.
- Levin, S. 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology* **73**:1943–67.
- Liu, C., P. M. Berry, T. P. Dawson, and R. G. Pearson. 2005. Selecting Thresholds of Occurrence in the Prediction of Species Distributions. *Ecography* **28**:385–393.
- Liu, C., M. White, and G. Newel. 2013. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography* **40**:778–789.
- Loarie, S. R., B. E. Carter, K. Hayhoe, S. McMahon, R. Moe, C. A. Knight, and D. D. Ackerly. 2008. Climate Change and the Future of California's Endemic Flora. *PLoS One* **3**:e2502.
- Loarie, S. R., P. B. Duffy, H. Hamilton, G. P. Asner, C. B. Field, and D. D. Ackerly. 2009. The velocity of climate change. *Nature* **462**:1052–5.
- Lomba, A., L. Pellissier, C. Randin, J. Vicente, F. Moreira, J. Honrado, and A. Guisan. 2010. Overcoming the rare species modelling paradox: A novel hierarchical framework applied to an Iberian endemic plant. *Biological Conservation* **143**:2647–2657.
- Loucks, C., S. Barber-Meyer, A. A. Hossain, A. Barlow, and R. M. Chowdhury. 2009. Sea level rise and tigers: Predicted impacts to Bangladesh's Sundarbans mangroves. *Climatic Change* **98**:291–298.
- Luoto, M., R. Virkkala, and R. K. Heikkinen. 2007. The role of land cover in bioclimatic models depends on spatial resolution. *Global Ecology and Biogeography* **16**:34–42.
- Mace, G. M., N. J. Collar, K. J. Gaston, C. Hilton-Taylor, H. R. Akçakaya, N. Leader-Williams, E. J. Milner-Gulland, and S. N. Stuart. 2008. Quantification of extinction risk: IUCN's system for classifying threatened species. *Conservation Biology* **22**:1424–42.
- MacKenzie, D. I. 2006. *Occupancy Estimation and Modeling: Inferring Patterns and Dynamics of Species Occurrence*. Elsevier, Amsterdam.
- Maclean, I. M. D., J. J. Bennie, A. J. Scott, and R. J. Wilson. 2012. A high-resolution model of soil and surface water conditions. *Ecological Modelling* **237–238**:109–119.
- MacPhee, R. D. E., A. N. Tikhonov, D. Mol, and A. D. Greenwood. 2005. Late Quaternary loss of genetic diversity in muskox (Ovibos). *BMC Evolutionary Biology* **5**:1.
- Madon, B., D. I. Warton, and M. B. Araújo. 2013. Community-level vs species-specific approaches to model selection. *Ecography* **36**:1291–1298.
- Maidment, R. I., D. Grimes, R. P. Allan, E. Tarnavsky, M. Stringer, T. Hewison, R. Roebeling, and E. Black. 2014. The 30 year TAMSAT African Rainfall Climatology And Time series (TARCAT) data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **119**:10619–10644.
- Mantyka-Pringle, C. S., T. G. Martin, D. B. Moffatt, S. Linke, and J. R. Rhodes. 2014. Understanding and predicting the combined effects of climate change and land-use change on freshwater macroinvertebrates and fish. *Journal of Applied Ecology* **51**:572–581.
- Mantyka-Pringle, C. S., T. G. Martin, D. B. Moffatt, J. Udy, J. Olley, N. Saxton, F. Sheldon, S. E. Bunn, and J. R. Rhodes. 2016. Prioritizing management actions for the conservation of freshwater biodiversity under changing climate and land-cover. *Biological Conservation* **197**:80–89.
- Marmion, M., M. Parviainen, M. Luoto, R. K. Heikkinen, and W. Thuiller. 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions* **15**:59–69.
- Martay, B., D. T. Monteith, M. J. Brewer, T. Brereton, C. R. Shortall, and J. W. Pearce-Higgins. 2016. An indicator highlights seasonal variation in the response of Lepidoptera communities to warming. *Ecological Indicators* **68**:126–133.
- Martin, T. G., M. A. Burgman, F. Fidler, P. M. Kuhnert, S. Low-Choy, M. McBride, and K. Mengersen. 2012. Eliciting Expert Knowledge in Conservation Science. *Conservation Biology* **26**:29–38.
- Martin, T. G., H. Murphy, A. Liedloff, C. Thomas, I. Chadès, G. Cook, R. Fensham, J. McIvor, and R. D. van Klinken. 2015. Buffel grass and climate change: a framework for projecting invasive species distributions when data are scarce. *Biological Invasions* **17**:3197–3210.
- Maschinski, J., J. E. Baggs, P. F. Quintana-Ascencio, and E. S. Menges. 2006. Using Population Viability Analysis to Predict the Effects of Climate Change on the Extinction Risk of an Endangered Limestone Endemic Shrub, Arizona Cliffrose. *Conservation Biology* **20**:218–228.
- Maxwell, S. L., O. Venter, K. R. Jones, and J. E. M. Watson. 2015. Integrating human responses to climate change into conservation vulnerability assessments and adaptation planning. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1355**:98–116.
- McCain, C. M. 2009. Vertebrate range sizes indicate that mountains may be “higher” in the tropics. *Ecology Letters* **12**:550–60.
- McCain, C., T. Szewczyk, and K. Bracy Knight. 2016. Population variability complicates the accurate detection of climate change responses. *Global Change Biology* **22**:2081–2093.
- McKenna, J. E., D. M. Carlson, and M. L. Payne-Wynne. 2013. Predicting locations of rare aquatic species' habitat with a combination of species-specific and assemblage-based models. *Diversity and Distributions* **19**:503–517.
- McKenna, J. E. J. 2001. Biological structure and dynamics of littoral fish assemblages in the Eastern Finger Lakes. *Aquatic Ecosystem Health & Management* **4**:91–114.
- McKenna, J. E. J. 2003. An enhanced cluster analysis program with bootstrap significance testing for ecological community analysis. *Environmental Modelling & Software* **18**:205–220.
- McNamara, A. 2010. *Zoological Society of London: Climate Change Vulnerability of Migratory Species*. London.
- Meng, H., J. Carr, J. Beraducci, P. Bowles, W. Branch, C. Capitani, J. Chenga, N. Cox, K. Howell, R. Marchant, B. Mbilinyi, K. Mukama, P. J. Platts, I. Safari, S. Spawls, Y. Shennan-Farpon, P. Wagner, and N. D. Burgess. 2016. Tanzania's reptile biodiversity: distribution, threats and climate change vulnerability. *Biological Conservation*.
- Merow, C., M. J. Smith, and J. A. Silander. 2013. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography* **36**:1058–1069.
- Metz, C. E. 1978. Basic principles of ROC analysis. *Seminars in nuclear medicine* **8**:283–298.
- Meyer, C., H. Kreft, R. Guralnick, and W. Jetz. 2015. Global priorities for an effective information basis of biodiversity distributions. *Nature Communications* **6**:8221.
- Midgley, G. F., and W. J. Bond. 2015. Future of African terrestrial biodiversity and ecosystems under anthropogenic climate change. *Nature Climate Change* **5**:823–829.



- Midgley, G. F., I. D. Davies, C. H. Albert, R. Altwegg, L. Hannah, G. O. Hughes, L. R. O'Halloran, C. Seo, J. H. Thorne, and W. Thuiller. 2010. BioMove – an integrated platform simulating the dynamic response of species to environmental change. *Ecography* **33**:612–616.
- Midgley, G. F., and W. Thuiller. 2007. Potential vulnerability of Namaqualand plant diversity to anthropogenic climate change. *Journal of Arid Environments* **70**:615–628.
- Midgley, G., L. Hannah, D. Millar, W. Thuiller, and A. Booth. 2003. Developing regional and species-level assessments of climate change impacts on biodiversity in the Cape Floristic Region. *Biological Conservation* **112**:87–97.
- Midgley, S. J., R. A. G. Davies, and S. Chesterman. 2011. Climate risk and vulnerability mapping: status quo (2008) and future (2050) in Southern Africa. Cape Town.
- Mitchell, T. D., T. R. Carter, P. D. Jones, M. Hulme, and M. New. 2004. A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100). Tyndall Centre for Climate Change Research **55**:1–30.
- Mitikka, V., R. K. Heikkinen, M. Luoto, M. B. Araújo, K. Saarinen, J. Pöyry, and S. Fronzek. 2007. Predicting range expansion of the map butterfly in Northern Europe using bioclimatic models. *Biodiversity and Conservation* **17**:623–641.
- Møller, A. P., N. Saino, P. Adamík, R. Ambrosini, A. Antonov, D. Campobello, B. G. Stokke, F. Fossøy, E. Lehikoinen, M. Martin-Vivaldi, A. Moksnes, C. Moskat, E. Røskaft, D. Rubolini, K. Schulze-Hagen, M. Soler, and J. A. Shykoff. 2011. Rapid change in host use of the common cuckoo *Cuculus canorus* linked to climate change. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* **278**:733–8.
- Molnár, P. K., A. E. Derocher, G. W. Thiemann, and M. A. Lewis. 2010. Predicting survival, reproduction and abundance of polar bears under climate change. *Biological Conservation* **143**:1612–1622.
- Monahan, W. B. 2009. A mechanistic niche model for measuring species' distributional responses to seasonal temperature gradients. *PLoS One* **4**:e7921.
- Morales, P., T. Hickler, D. Rowell, B. Smith, and M. T. Sykes. 2007. Changes in European ecosystem productivity and carbon balance driven by regional climate model output. *Global Change Biology* **13**:108–122.
- Morelli, T. L., A. B. Smith, C. R. Kastely, I. Mastroserio, C. Moritz, and S. R. Beissinger. 2012. Anthropogenic refugia ameliorate the severe climate-related decline of a montane mammal along its trailing edge. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **279**:4279–86.
- Morin, X., and W. Thuiller. 2009. Comparing niche- and process-based models to reduce prediction uncertainty in species range shifts under climate change. *Ecology* **90**:1301–13.
- Morin, X., D. Viner, and I. Chuine. 2008. Tree species range shifts at a continental scale : new predictive insights from a process-based model. *Journal of Ecology* **96**:784–794.
- Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. a Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant, and T. J. Wilbanks. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* **463**:747–56.
- Moyle, P. B., J. D. Kiernan, P. K. Crain, and R. M. Quiñones. 2013. Climate change vulnerability of native and alien freshwater fishes of California: a systematic assessment approach. *PLoS One* **8**:e63883.
- Murray, J. V., A. W. Goldizen, R. A. O'Leary, C. A. McAlpine, H. P. Possingham, and S. L. Choy. 2009a. How useful is expert opinion for predicting the distribution of a species within and beyond the region of expertise? A case study using brush-tailed rock-wallabies *Petrogale penicillata*. *Journal of Applied Ecology* **46**:842–851.
- Murray, K. a., L. F. Skerratt, R. Speare, and H. McCallum. 2009b. Impact and Dynamics of Disease in Species Threatened by the Amphibian Chytrid Fungus, *Batrachochytrium dendrobatidis*. *Conservation Biology* **23**:1242–1252.
- Narum, S. R., A. Buerkle, J. W. Davey, M. R. Miller, and P. A. Hohenlohe. 2013. Genotyping-by-sequencing in ecological and conservation genomics. *Molecular Ecology* **22**:2841–2847.
- Nenzén, H. K., and M. B. Araújo. 2011. Choice of threshold alters projections of species range shifts under climate change. *Ecological Modelling* **222**:3346–3354.
- Newbold, T., J. P. W. Scharlemann, S. H. M. Butchart, C. H. Sekercioglu, R. Alkemade, H. Booth, and D. W. Purves. 2013. Ecological traits affect the response of tropical forest bird species to land-use intensity. Ecological traits affect the response of tropical forest bird species to land-use intensity Author for correspondence : *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* **280**:2012–2131.
- Nicotra, A., E. A. Beever, A. L. Robertson, G. E. Hofmann, and J. O'Leary. 2015. Assessing the components of adaptive capacity to improve conservation and management efforts under global change. *Conservation biology: the journal of the Society for Conservation Biology* **29**:1268–1278.
- O'Neill, G. A., A. Hamann, and T. Wang. 2008. Accounting for population variation improves estimates of the impact of climate change on species' growth and distribution. *Journal of Applied Ecology* **45**:1040–1049.
- Ockendon, N., D. J. Baker, J. A. Carr, E. C. White, R. E. A. Almond, T. Amano, E. Bertram, R. B. Bradbury, C. Bradley, S. H. M. Butchart, N. Doswald, W. Foden, D. J. C. Gill, R. E. Green, W. J. Sutherland, E. V. J. Tanner, and J. W. Pearce-Higgins. 2014. Mechanisms underpinning climatic impacts on natural populations: Altered species interactions are more important than direct effects. *Global Change Biology* **20**:2221–2229.
- Ogutu, J. O., H.-P. Piepho, H. T. Dublin, N. Bhola, and R. S. Reid. 2009. Dynamics of Mara–Serengeti ungulates in relation to land use changes. *Journal of Zoology* **278**:1–14.
- Ohlemüller, R., B. J. Anderson, S. H. M. Butchart, M. B. Arau, O. Kudrna, R. S. Ridgely, and C. D. Thomas. 2008. The coincidence of climatic and species rarity : high risk to small-range species from climate change. *Biology Letters* **4**:568–572.
- Ohlemüller, R., E. S. Gritti, M. T. Sykes, and C. D. Thomas. 2006. Towards European climate risk surfaces : the extent and distribution of analogous and non-analogous climates 1931–2100. *Global Ecology and Biogeography* **15**:395–405.
- Olsson, C., and A. M. Jönsson. 2014. Process-based models not always better than empirical models for simulating budburst of Norway spruce and birch in Europe. *Global Change Biology* **20**:3492–3507.
- Ovaskainen, O., and J. Soininen. 2011. Making more out of sparse data: hierarchical modeling of species communities. *Ecology* **92**:289–95.
- Overgaard, J., M. R. Kearney, and A. A. Hoffmann. 2014. Sensitivity to thermal extremes in Australian *Drosophila* implies similar impacts of climate change on the distribution of widespread and tropical species. *Global Change Biology* **20**:1738–50.
- Overpeck, J. T., R. S. Webb, and T. Webb. 1992. Mapping eastern North American vegetation change of the past 18 ka: no-analogs and the future. *Geology* **20**:1071–1074.
- Pacifici, M., W. B. Foden, P. Visconti, J. E. M. Watson, S. H. M. Butchart, K. M. Kovacs, B. R. Scheffers, D. G. Hole, T. G. Martin, H. R. Akçakaya, R. T. Corlett, B. Huntley, D. Bickford, J. A. Carr, A. A. Hoffmann, G. F. Midgley, P.-K. P., R. G. Pearson, S. E. Williams, S. G. Willis, B. Young, and C. Rondinini. 2015. Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change* **5**:215–225.
- Parmesan, C., C. Duarte, E. Poloczanska, A. J. Richardson, and M. C. Singer. 2011. Overstretching attribution. *Nature Climate Change* **1**:2–4.
- Parmesan, C., and G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* **421**:37–42.

- Paterson, J. S., M. B. Araújo, P. M. Berry, J. M. Piper, and M. D. A. Rounsevell. 2008. Mitigation, adaptation, and the threat to biodiversity. *Conservation Biology* **22**:1352–1355.
- Pearce-Higgins, J. W., S. M. Eglinton, B. Martay, and D. E. Chamberlain. 2015. Drivers of climate change impacts on bird communities. *Journal of Animal Ecology* **84**:943–954.
- Pearce-Higgins, J. W., and R. E. Green. 2014. *Birds and climate change: impacts and conservation responses*. Cambridge University Press.
- Pearman, P. B., M. D'Amen, C. H. Graham, W. Thuiller, and N. E. Zimmermann. 2010. Within-taxon niche structure: Niche conservatism, divergence and predicted effects of climate change. *Ecography* **33**:990–1003.
- Pearson, R. G. 2007. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners. *Lessons in conservation* **3**:1–50.
- Pearson, R. G. 2010. Species distribution modeling for conservation educators and practitioners. *Lessons in conservation*:54–89.
- Pearson, R. G., and T. P. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* **12**:361–371.
- Pearson, R. G., C. J. Raxworthy, M. Nakamura, and A. Townsend Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* **34**:102–117.
- Pearson, R. G., J. C. Stanton, K. T. Shoemaker, M. E. Aiello-lammens, P. J. Ersts, N. Horning, D. A. Fordham, C. J. Raxworthy, H. Y. Ryu, J. Mcnees, and H. R. Akçakaya. 2014. Life history and spatial traits predict extinction risk due to climate change. *Nature Climate Change* **4**:217–221.
- Pearson, R. G., W. Thuiller, M. B. Araújo, E. Martinez-Meyer, L. Brotons, C. McClean, L. Miles, P. Segurado, T. P. Dawson, and D. C. Lees. 2006. Model-based uncertainty in species range prediction. *Journal of Biogeography* **33**:1704–1711.
- Penone, C., A. D. Davidson, K. T. Shoemaker, M. Di Marco, C. Rondinini, T. M. Brooks, B. E. Young, C. H. Graham, and G. C. Costa. 2014. Imputation of missing data in life-history trait datasets: which approach performs the best? *Methods in Ecology and Evolution* **5**:961–970.
- Pereira, H. M., P. W. Leadley, V. Proenca, R. Alkemade, J. P. W. Scharlemann, J. F. Fernandez-Manjarres, M. B. Araújo, P. Balvanera, R. Biggs, W. W. L. Cheung, L. Chini, H. D. Cooper, E. L. Gilman, S. Guenette, G. C. Hurtt, H. P. Huntington, G. M. Mace, T. Oberdorff, C. Revenga, P. Rodrigues, R. J. Scholes, U. R. Sumaila, and M. Walpole. 2010. Scenarios for global biodiversity in the 21st century. *Science* **330**:1496–1501.
- Phillips, S. J., P. Avenue, and F. Park. 2004. A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*:83.
- Phillips, S. J., and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* **31**:161–175.
- Phillips, S. J., M. Dudík, J. Elith, C. H. Graham, A. Lehmann, J. Leathwick, and S. Ferrier. 2009. Sample selection bias and presence-only distribution models: Implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications* **19**:181–197.
- Phillips, S. J., P. Williams, G. Midgley, and A. Archer. 2008. Optimizing dispersal corridors for the Cape Proteaceae using network flow. *Ecological Applications* **18**:1200–11.
- Pigott, C. D., and J. P. Huntley. 1981. Factors controlling the distribution of *Tilia cordata* at the northern limits of its geographical range III. Nature and causes of seed sterility. *New Phytologist* **87**:817–839.
- Pimm, S. L., C. N. Jenkins, R. Abell, T. M. Brooks, J. L. Gittleman, L. N. Joppa, P. H. Raven, C. M. Roberts, and J. O. Sexton. 2014. The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science* **344**:1246752.
- Platts, P. J., A. Ahrends, R. E. Gereau, C. J. McClean, J. C. Lovett, A. R. Marshall, P. K. E. Pellikka, M. Mulligan, E. Fanning, and R. Marchant. 2010. Can distribution models help refine inventory-based estimates of conservation priority? A case study in the Eastern Arc forests of Tanzania and Kenya. *Diversity and Distributions* **16**:628–642.
- Platts, P. J., R. A. Garcia, C. Hof, W. Foden, L. A. Hansen, C. Rahbek, and N. D. Burgess. 2014. Conservation implications of omitting narrow-ranging taxa from species distribution models, now and in the future. *Diversity and Distributions* **20**:1307–1320.
- Platts, P. J., R. E. Gereau, N. D. Burgess, and R. Marchant. 2013a. Spatial heterogeneity of climate change in an Afrotropical centre of endemism. *Ecography* **36**:518–530.
- Platts, P. J., R. E. Gereau, N. D. Burgess, R. Marchant, C. S. Group, M. B. Garden, and E. A. Mountains. 2013b. Spatial heterogeneity of climate change in an Afrotropical centre of endemism:1–35.
- Platts, P. J., C. J. McClean, J. C. Lovett, and R. Marchant. 2008. Predicting tree distributions in an East African biodiversity hotspot: model selection, data bias and envelope uncertainty. *Ecological Modelling* **218**:121–134.
- Platts, P. J., P. A. Omeny, and R. Marchant. 2015. AFRICLIM: high resolution climate projections for ecological applications in Africa. *African Journal of Ecology* **53**:103–108.
- Ponce-Reyes, R., E. Nicholson, P. W. J. Baxter, R. A. Fuller, and H. Possingham. 2013. Extinction risk in cloud forest fragments under climate change and habitat loss. *Diversity and Distributions* **19**:518–529.
- Pope, V., S. Brown, R. Clark, M. Collins, W. Collins, C. Dearden, J. Gunson, G. Harris, C. Jones, A. Keen, J. Lowe, M. Ringer, C. Senior, S. Sitch, M. Webb, and S. Woodward. 2007. The Met Office Hadley Centre climate modelling capability: the competing requirements for improved resolution, complexity and dealing with uncertainty. *Philosophical Transactions of the Royal Society A, Mathematical, Physical & Engineering Sciences* **365**:2635–2657.
- Radchuk, V., C. Turlure, and N. Schtickzelle. 2013. Each life stage matters: the importance of assessing the response to climate change over the complete life cycle in butterflies. *The Journal of Animal Ecology* **82**:275–85.
- Ragin, C. C., and H. S. Becker. 1992. *What is a case?: exploring the foundations of social inquiry*. Cambridge University Press.
- Ramirez-Villegas, J., and A. Jarvis. 2010. Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method. CIAT Decision and Policy Analysis Working Paper, no. 1:1–18.
- Raupach, M. R., G. Marland, P. Ciais, C. Le Quéré, J. G. Canadell, G. Klepper, and C. B. Field. 2007. Global and regional drivers of accelerating CO<sub>2</sub> emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**:10288–10293.
- Reece, J. S., and R. F. Noss. 2014. Prioritizing Species by Conservation Value and Vulnerability : A New Index Applied to Species Threatened by Sea-Level Rise and Other Risks in Florida. *Natural Areas Journal* **34**:31–45.
- Reed, T. E., D. E. Schindler, and R. S. Waples. 2011. Interacting Effects of Phenotypic Plasticity and Evolution on Population Persistence in a Changing Climate. *Conservation Biology* **25**:56–63.
- Regehr, E. V., C. M. Hunter, H. Caswell, S. C. Amstrup, and I. Stirling. 2010. Survival and breeding of polar bears in the southern Beaufort Sea in relation to sea ice. *The Journal of Animal Ecology* **79**:117–27.
- Renwick, A. R., D. Massimino, S. E. Newson, D. E. Chamberlain, J. W. Pearce-Higgins, and A. Johnston. 2012. Modelling changes in species' abundance in response to projected climate change. *Diversity and Distributions* **18**:121–132.
- Rogelj, J., M. Meinshausen, and R. Knutti. 2012. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Climate Change*:248–253.
- Root, T. L., J. T. Price, K. R. Hall, and S. H. Schneider. 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature* **421**:57–60.

- Royle, J. A., R. B. Chandler, C. Yackulic, and J. D. Nichols. 2012. Likelihood analysis of species occurrence probability from presence-only data for modelling species distributions. *Methods in Ecology and Evolution* **3**:545–554.
- Ruegg, K. C., R. J. Hijmans, and C. Moritz. 2006. Climate change and the origin of migratory pathways in the Swainson's thrush, *Catharus ustulatus*. *Journal of Biogeography* **33**:1172–1182.
- Runge, M. C., S. J. Converse, and J. E. Lyons. 2011. Which uncertainty? Using expert elicitation and expected value of information to design an adaptive program. *Biological Conservation* **144**:1214–1223.
- Saltz, D., D. I. Rubenstein, and G. C. White. 2006. The impact of increased environmental stochasticity due to climate change on the dynamics of Asiatic wild ass. *Conservation Biology* **20**:1402–9.
- Schipper, J., J. S. Chanson, F. Chiozza, N. A. Cox, M. Hoffmann, V. Katariya, J. Lamoreux, A. S. L. Rodrigues, S. N. Stuart, H. J. Temple, J. Baillie, L. Boitani, T. E. Lacher, R. A. Mittermeier, A. T. Smith, D. Absolon, J. M. Aguiar, G. Amori, N. Bakkour, R. Baldi, R. J. Berridge, J. Bielby, P. A. Black, J. J. Blanc, T. M. Brooks, J. A. Burton, T. M. Butynski, G. Catullo, R. Chapman, Z. Cokeliss, B. Collen, J. Conroy, J. G. Cooke, G. A. B. da Fonseca, A. E. Derocher, H. T. Dublin, J. W. Duckworth, L. Emmons, R. H. Emslie, M. Festa-Bianchet, M. Foster, S. Foster, D. L. Garshelis, C. Gates, M. Gimenez-Dixon, S. Gonzalez, J. F. Gonzalez-Maya, T. C. Good, G. Hammerson, P. S. Hammond, D. Happold, M. Happold, J. Hare, R. B. Harris, C. E. Hawkins, M. Haywood, L. R. Heaney, S. Hedges, K. M. Helgen, C. Hilton-Taylor, S. A. Hussain, N. Ishii, T. A. Jefferson, R. K. B. Jenkins, C. H. Johnston, M. Keith, J. Kingdon, D. H. Knox, K. M. Kovacs, P. Langhammer, K. Leus, R. Lewison, G. Lichtenstein, L. F. Lowry, Z. Macavoy, G. M. Mace, D. P. Mallon, M. Masi, M. W. McKnight, R. A. Medellín, P. Medici, G. Mills, P. D. Moehlman, S. Molur, A. Mora, K. Nowell, J. F. Oates, W. Olech, W. R. L. Oliver, M. Oprea, B. D. Patterson, W. F. Perrin, B. A. Polidoro, C. Pollock, A. Powel, Y. Protas, P. Racey, J. Ragle, P. Ramani, G. Rathbun, R. R. Reeves, S. B. Reilly, J. E. Reynolds, C. Rondinini, R. G. Rosell-Ambal, M. Rulli, A. B. Rylands, S. Savini, C. J. Schank, W. Sechrest, C. Self-Sullivan, A. Shoemaker, C. Sillero-Zubiri, N. De Silva, D. E. Smith, C. Srinivasulu, P. J. Stephenson, N. van Strien, B. K. Talukdar, B. L. Taylor, R. Timmins, D. G. Tirira, M. F. Tognelli, K. Tsytulina, L. M. Veiga, J.-C. Vié, E. A. Williamson, S. A. Wyatt, Y. Xie, and B. E. Young. 2008. The status of the world's land and marine mammals: diversity, threat, and knowledge. *Science* **322**:225–30.
- Schloss, C. A., T. A. Nuñez, and J. J. Lawler. 2012. Dispersal will limit ability of mammals to track climate change in the Western Hemisphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **109**:8606–8611.
- Scholes, R. J., M. Walters, E. Turak, H. Saarenmaa, D. P. Faith, H. A. Mooney, C. H. R. Heip, S. Ferrier, R. H. G. Jongman, I. J. Harrison, T. Yahara, H. M. Pereira, A. Larigauderie, and G. Geller. 2012. Building a global observing system for biodiversity. *Current Opinion in Environmental Sustainability* **4**:139–146.
- Schrodt, F., J. Kattge, H. Shan, F. Fazayeli, J. Joswig, A. Banerjee, M. Reichstein, G. Bönsch, S. Díaz, J. Dickie, A. Gillison, A. Karpatsne, S. Lavorel, P. Leadley, C. B. Wirth, I. J. Wright, S. J. Wright, and P. B. Reich. 2015. BHPMF - a hierarchical Bayesian approach to gap-filling and trait prediction for macroecology and functional biogeography. *Global Ecology and Biogeography* **24**:1510–1521.
- Schwartz, M. W., L. R. Iverson, A. M. Prasad, S. N. Matthews, R. J. O'Connor, and O'Connor R. J. 2006. Predicting extinctions as a result of climate change. *Ecology* **87**:1611–5.
- Segan, D. B., D. G. Hole, C. I. Donatti, C. Zganjar, S. Martin, and J. Watson. 2015. Considering the impact of climate change on human communities significantly alters the outcome of species and site-based vulnerability assessments. *Diversity & Distributions* **21**:1101–1111.
- Settele, J., R. J. Scholes, R. Betts, S. Bunn, P. Leadley, D. Nepstad, J. T. Overpeck, and M. S. Toboada. 2014. Chapter 4. Terrestrial and Inland Water Systems. Pages 271–359 in C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, E. S. B. Girma, A. N. Kissel, S. Levy, P. R. MacCracken, M. D. Mastrandrea, and L. L. White, editors. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Shaw, R. G., and J. R. Etterson. 2012. Rapid climate change and the rate of adaptation : insight from experimental quantitative genetics. *The New Phytologist* **195**:752–765.
- Sheridan, J. A., and D. Bickford. 2011. Shrinking body size as an ecological response to climate change. *Nature Climate Change* **1**:401–406.
- Shoo, L. P., A. A. Hoffmann, S. Garnett, R. L. Pressey, Y. M. Williams, M. Taylor, L. Falconi, C. J. Yates, J. K. Scott, D. Alagador, and S. E. Williams. 2013. Making decisions to conserve species under climate change. *Climatic Change* **119**:239–246.
- Shoo, L. P., A. A. Hoffmann, S. Garnett, R. L. Pressey, Y. M. Williams, M. Taylor, L. Falconi, C. J. Yates, J. K. Scott, D. Alagador, and S. E. Williams. 2015. Making decisions to conserve species under climate change. *Climatic Change* **119**:239–246.
- Sinervo, B., F. Méndez-de-la-Cruz, D. B. Miles, B. Heulin, E. Bastiaans, M. Villagrán-Santa Cruz, R. Lara-Resendiz, N. Martínez-Méndez, M. L. Calderón-Espinosa, R. N. Meza-Lázaro, H. Gadsden, L. J. Avila, M. Morando, I. J. De la Riva, P. Victoriano Sepulveda, C. F. D. Rocha, N. Ibargüengoytia, C. Aguilar Puntriano, M. Massot, V. Lepetz, T. A. Oksanen, D. G. Chapple, A. M. Bauer, W. R. Branch, J. Clobert, and J. W. Sites. 2010. Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. *Science* **328**:894–9.
- Smith, A. A. B., M. J. Santos, M. S. Koo, K. M. C. Rowe, C. Rowe, Kevin, J. L. Patton, J. D. Perrine, S. R. Beissinger, and C. Moritz. 2013. Evaluation of species distribution models by resampling of sites surveyed a century ago by Joseph Grinnell. *Ecography* **36**:1017–1031.
- Smith, A. B., Q. G. Long, and M. A. Albrecht. 2016. Shifting targets: spatial priorities for ex situ plant conservation depend on interactions between current threats, climate change, and uncertainty. *Biodiversity and Conservation* **25**:905–922.
- Snover, A. K., N. J. Mantua, J. S. Littell, M. A. Alexander, M. M. McClure, and J. Nye. 2013. Choosing and Using Climate-Change Scenarios for Ecological-Impact Assessments and Conservation Decisions. *Conservation Biology* **27**:1147–1157.
- Spiller, D. A., and T. W. Schoener. 2008. Climatic control of trophic interaction strength: The effect of lizards on spiders. *Oecologia* **154**:763–771.
- Stainforth, D. A., T. Aina, C. Christensen, M. Collins, N. Faull, D. J. Frame, J. A. Kettleborough, S. Knight, A. Martin, J. M. Murphy, C. Piani, D. Sexton, L. A. Smith, R. A. Spicer, A. J. Thorpe, and M. R. Allen. 2005. Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature* **433**:403–406.
- Stanton, J. C., K. T. Shoemaker, R. G. Pearson, and H. R. Akçakaya. 2015. Warning times for species extinctions due to climate change. *Global Change Biology* **21**:1066–1077.
- Stein, B. A., P. Glick, N. Edelson, and A. Staudt. 2014. Climate-Smart Conservation: Putting Adaptation Principles into Practice. Washington D.C.
- Still, S. M., A. L. Frances, A. C. Treher, L. Oliver, and S. M. Still. 2015. Using Two Climate Change Vulnerability Assessment Methods to Prioritize and Manage Rare Plants : A Case Study. *Natural Areas Journal* **35**:106–121.
- Stockwell, D. R. B., and A. T. Peterson. 2002. Effects of sample size on accuracy of species distribution models. *Ecological Modelling* **148**:1–13.
- Stolar, J., and S. E. Nielsen. 2015. Accounting for spatially biased sampling effort in presence-only species distribution modelling. *Diversity and Distributions* **21**:595–608.



- Svenning, J.-C., and F. Skov. 2004. Limited filling of the potential range in European tree species. *Ecology Letters* 7:565–573.
- Swenson, N. G. 2014. Phylogenetic imputation of plant functional trait databases. *Ecography* 37:105–110.
- Tabor, K., and J. W. Williams. 2010. Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. *Ecological Applications* 20:554–65.
- Tarnavsky, E., D. Grimes, R. Maidment, E. Black, R. Allan, M. Stringer, R. Chadwick, and F. Kayitakire. 2014. Extension of the TAMSAT Satellite-based Rainfall Monitoring over Africa and from 1983 to present. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 53:2805–2822.
- Taugourdeau, S., J. Villerd, S. Plantureux, O. Huguenin-Elie, and B. Amiaud. 2014. Filling the gap in functional trait databases: use of ecological hypotheses to replace missing data. *Ecology and Evolution* 4:944–958.
- Teplitsky, C., and V. Millien. 2013. Climate warming and Bergmann's rule through time: is there any evidence? *Evolutionary Applications* 7:156–168.
- Thackeray, S. J., T. H. Sparks, M. Frederiksen, S. Burthe, P. J. Bacon, J. R. Bell, M. S. Botham, T. M. Brereton, P. W. Bright, L. Carvalho, T. Clutton-Brock, A. Dawson, M. Edwards, J. M. Elliott, R. Harrington, D. Johns, I. D. Jones, J. T. Jones, D. I. Leech, D. B. Roy, W. A. Scott, M. Smith, R. J. Smithers, I. J. Winfield, and S. Wanless. 2010. Trophic level asynchrony in rates of phenological change for marine, freshwater and terrestrial environments. *Global Change Biology* 16:3304–3313.
- Thaxter, C. B., A. C. Joys, R. D. Gregory, S. R. Baillie, and D. G. Noble. 2010. Hypotheses to explain patterns of population change among breeding bird species in England. *Biological Conservation* 143:2006–2019.
- Thomas, C. D., A. Cameron, R. E. Green, M. Bakkenes, L. J. Beaumont, Y. C. Collingham, B. F. N. Erasmus, M. F. De Siqueira, A. Grainger, L. Hannah, L. Hughes, B. Huntley, A. S. Van Jaarsveld, G. F. Midgley, L. Miles, M. A. Ortega-Huerta, A. T. Peterson, O. L. Phillips, and S. E. Williams. 2004. Extinction risk from climate change. *Nature* 427:145–148.
- Thomas, C. D., J. K. Hill, B. J. Anderson, S. Bailey, C. M. Beale, R. B. Bradbury, C. R. Bulman, H. Q. P. Crick, F. Eigenbrod, H. M. Griffiths, W. E. Kunin, T. H. Oliver, C. A. Walmsley, K. Watts, N. T. Worsfold, and T. Yardley. 2011. A framework for assessing threats and benefits to species responding to climate change. *Methods in Ecology and Evolution* 2:125–142.
- Thompson, L. C., M. I. Escobar, C. M. Mosser, D. R. Purkey, D. Yates, and P. B. Moyle. 2012. Water management adaptations to prevent loss of spring-run Chinook Salmon in California under climate Change. *Journal of Water Resources Planning and Management* 318.5:465–478.
- Thompson, R. M., J. Beardall, J. Beringer, M. Grace, and P. Sardina. 2013. Means and extremes: Building variability into community-level climate change experiments. *Ecology Letters* 16:799–806.
- Thuiller, W. 2003. BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology* 9:1353–1362.
- Thuiller, W., L. Brotons, M. B. Araújo, and S. Lavorel. 2004. Effects of restricting environmental range of data to project current and future species distributions. *Ecography* 27:165–172.
- Thuiller, W., S. Lavergne, C. Roquet, I. Boulangeat, B. Lafourcade, and M. B. Araújo. 2011. Consequences of climate change on the tree of life in Europe. *Nature* 470:531–534.
- Thuiller, W., S. Lavorel, M. B. Araújo, M. T. Sykes, and I. C. Prentice. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102:8245–50.
- Tingley, M. W., M. S. Koo, C. Moritz, A. C. Rush, and S. R. Beissinger. 2012. The push and pull of climate change causes heterogeneous shifts in avian elevational ranges. *Global Change Biology* 18:3279–3290.
- Tingley, M. W., W. B. Monahan, S. R. Beissinger, and C. Moritz. 2009. Birds track their Grinnellian niche through a century of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106:19637–19643.
- Trivino, M., M. Cabeza, W. Thuiller, T. Hickler, and M. B. Araújo. 2013. Risk assessment for Iberian birds under global change. *Biological Conservation* 168:192–200.
- Turner, W. R., B. A. Bradley, L. D. Estes, D. G. Hole, M. Oppenheimer, and D. S. Wilcove. 2010. Climate change: helping nature survive the human response. *Conservation Letters* 3:304–312.
- Urban, M. C., B. L. Phillips, D. K. Skelly, and R. Shine. 2007. The cane toad's (*Chaunus [Bufo] marinus*) increasing ability to invade Australia is revealed by a dynamically updated range model. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 274:1413–1419.
- Urban, M. C., J. J. Tewksbury, and K. S. Sheldon. 2012. On a collision course: competition and dispersal differences create no-analogue communities and cause extinctions during climate change. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 279:2072–80.
- Vale, C. G., and J. C. Brito. 2015. Desert-adapted species are vulnerable to climate change: Insights from the warmest region on Earth. *Global Ecology and Conservation* 4:369–379.
- Valladares, F., S. Matesanz, F. Guilhaumon, M. B. Araújo, L. Balaguer, M. Benito-Garzón, W. Cornwell, E. Gianoli, M. van Kleunen, D. E. Naya, A. B. Nicotra, H. Poorter, and M. A. Zavala. 2014. The effects of phenotypic plasticity and local adaptation on forecasts of species range shifts under climate change. *Ecology Letters* 17:1351–1364.
- Varela, S., R. P. Anderson, and F. Fernández-González. 2014. Environmental filters reduce the effects of sampling bias and improve predictions of ecological niche models. *Ecography* 37:1084–1091.
- Varela, S., J. Rodríguez, and J. M. Lobo. 2009. Is current climatic equilibrium a guarantee for the transferability of distribution model predictions? A case study of the spotted hyena. *Journal of Biogeography* 36:1645–1655.
- Vedder, O., S. Bouwhuis, and B. C. Sheldon. 2013. Quantitative Assessment of the Importance of Phenotypic Plasticity in Adaptation to Climate Change in Wild Bird Populations. *PLoS Biology* 11:e1001605.
- Violle, C., M.-L. Navas, D. Vile, E. Kazakou, C. Fortunel, I. Hummel, and E. Garnier. 2007. Let the concept of trait be functional! *Oikos* 116:882–892.
- Visconti, P., M. Bakkenes, D. Baisero, T. Brooks, S. H. M. Butchart, L. Joppa, R. Alkemade, M. Di Marco, L. Santini, M. Hoffmann, L. Maiorano, R. L. Pressey, A. Arponen, L. Boitani, A. E. Reside, D. P. van Vuuren, and C. Rondinini. 2015. Projecting Global Biodiversity Indicators under Future Development Scenarios. *Conservation Letters* 9:5–13.
- Visser, M. E. 2008. Keeping up with a warming world; assessing the rate of adaptation to climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 275:649–59.
- Vos, C. C., P. Berry, P. Opdam, H. Baveco, B. Nijhof, J. O'Hanley, C. Bell, and H. Kuipers. 2008. Adapting landscapes to climate change: examples of climate-proof ecosystem networks and priority adaptation zones. *Journal of Applied Ecology* 45:1722–1731.
- Vuuren, D. P., E. Stehfest, M. G. Elzen, T. Kram, J. Vliet, S. Deetman, M. Isaac, K. K. Goldewijk, A. Hof, A. M. Beltran, and R. Oostenrijk. 2011. RCP2. 6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 C. *Climatic Change* 109:95–116.
- Walker, P. A., and K. D. Cocks. 1991. HABITAT: a procedure for modelling a disjoint environmental envelope for a plant or animal species. *Global Ecol. Biogeog. Lett.* 1:108–18.
- Warren, R., J. VanDerWal, J. Price, J. A. Welbergen, I. Atkinson, J. Ramirez-Villegas, T. J. Osborn, A. Jarvis, L. P. Shoo, S. E. Williams, and J. Lowe. 2013. Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Climate Change* 3:678–682.
- Watling, J. I., D. N. Bucklin, C. Speroterra, L. A. Brandt, F. J. Mazzotti, and S. S. Románach. 2013. Validating predictions from climate envelope models. *PloS One* 8:e63600.
- Watson, J. E. M. 2014. Human responses to climate change will seriously impact biodiversity conservation: It's time we start planning for them. *Conservation Letters* 7:1–2.

- Watson, J. E. M., T. Iwamura, and N. Butt. 2013. Mapping vulnerability and conservation adaptation strategies under climate change. *Nature Climate Change* **3**:1–6.
- Weeks, A. R., C. M. Sgro, A. G. Young, R. Frankham, N. J. Mitchell, K. A. Miller, M. Byrne, D. J. Coates, M. D. B. Eldridge, P. Sunnucks, M. F. Breed, E. A. James, and A. A. Hoffmann. 2011. Assessing the benefits and risks of translocations in changing environments: A genetic perspective. *Evolutionary Applications* **4**:709–725.
- Wilgen, N. J. Van, V. Goodall, S. Holness, L. Chown, and M. A. Mcgeoch. 2015. Rising temperatures and changing rainfall patterns in South Africa's national parks. *International Journal of Climatology* **721**:doi:10.1002/joc.4377.
- Williams, J. N., C. Seo, J. Thorne, J. K. Nelson, S. Erwin, J. M. O'Brien, and M. W. Schwartz. 2009. Using species distribution models to predict new occurrences for rare plants. *Diversity and Distributions* **15**:565–576.
- Williams, J. W., S. T. Jackson, and J. E. Kutzbach. 2007. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **104**:5738–5742.
- Williams, J. W., B. N. Shuman, and T. Webb. 2001. Dissimilarity analyses of late-Quaternary vegetation and climate in North America. *Ecology* **82**:3346–3362.
- Williams, S. E., L. P. Shoo, J. L. Isaac, A. A. Hoffmann, and G. Langham. 2008. Towards an integrated framework for assessing the vulnerability of species to climate change. *PLoS Biology* **6**:2621–2626.
- Willis, S. G., W. Foden, D. J. Baker, E. Belle, N. D. Burgess, J. Carr, N. Doswald, R. A. Garcia, A. Hartley, C. Hof, T. Newbold, C. Rahbek, R. J. Smith, P. Visconti, B. E. Young, and S. H. M. Butchart. 2015. Integrating climate change vulnerability assessments from species distribution models and trait-based approaches. *Biological Conservation* **190**:167–178.
- Willis, S. G., J. K. Hill, C. D. Thomas, D. B. Roy, R. Fox, D. S. Blakeley, and B. Huntley. 2009. Assisted colonization in a changing climate: a test-study using two UK butterflies. *Conservation Letters* **2**:46–52.
- Wisn, M. S., R. J. Hijmans, J. Li, A. T. Peterson, C. H. Graham, and A. Guisan. 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity & Distributions* **14**:763–773.
- Wittmann, M. E., M. A. Barnes, C. L. Jerde, L. A. Jones, and D. M. Lodge. 2016. Confronting species distribution model predictions with species functional traits. *Ecology and Evolution* **6**:873–879.
- Woodruff, D. S. 2001. Declines of biomes and biotas and the future of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **98**:5471–6.
- Woodward, F. I. 1975a. Climatic control of altitudinal distribution of *Sedum rosea* (L.) Scop and *Sedum telephium* L. .1. Field observations. *New Phytologist* **74**:335–348.
- Woodward, F. I. I. 1975b. The climatic control of the altitudinal distribution of *Sedum rosea* (L.) Scop. and *S. telephium*. *New Phytologist* **74**:335–348.
- Woodward, F. I. I., and C. D. Pigott. 1975. The climatic control of the altitudinal distribution of *Sedum rosea* (L.) Scop and *S. telephium* L. I. Field observations. *New Phytologist* **74**:323–334.
- Yee, T. W., and N. D. Mitchell. 1991. Generalized additive models in plant ecology. *Journal of Vegetation Science* **2**:587–602.
- Young, B., E. Byers, K. Gravuer, K. Hall, G. Hammerson, and A. Redder. 2015a. Guidelines for Using the NatureServe Climate Change Vulnerability Index, Release 3.0. NatureServe, Arlington, VA.
- Young, B., E. Byers, G. Hammerson, A. Frances, L. Oliver, and A. Treher. 2016. Guidelines for Using the NatureServe Climate Change Vulnerability Index. Release 3.2. Arlington, Virginia.
- Young, B. E., N. S. Dubois, and E. L. Rowland. 2015b. Using the Climate Change Vulnerability Index to inform adaptation planning: lessons, innovations, and next steps. *Wilson Society Bulletin* **39**:174–181.
- Young, B. E., K. R. Hall, E. Byers, K. Gravuer, G. Hammerson, A. Redder, and K. Szabo. 2012. Rapid assessment of plant and animal vulnerability to climate change. Pages 129–150 in J. Brodie, E. Post, and D. Doak, editors. *Conserving Wildlife Populations in a Changing Climate*. University of Chicago Press, Chicago, IL.
- Zurell, D., J. Elith, and B. Schröder. 2012. Predicting to new environments: Tools for visualizing model behaviour and impacts on mapped distributions. *Diversity and Distributions* **18**:628–634.

# 12. Apéndice

**Apéndice Tabla A. Ejemplos de métodos que se han utilizado para aplicar un enfoque correlativo al EVCC.**

Tipo de método	Envoltura climática	Análisis de regresión	Aprendizaje automático	Enfoques bayesianos
Cómo funciona	<p><b>Este método ahora se considera anticuado, excepto para especies raras.</b></p> <p>Define el espacio bioclimático multidimensional donde la especie puede vivir. Supone que la especie es igualmente viable para cualquier combinación de variables bioclimáticas dentro de este espacio, e ignora las interacciones con otras variables, por ejemplo, la precipitación total y la temperatura media.</p>	Utiliza análisis de regresión para caracterizar la relación entre las especies y las variables bioclimáticas, en los rangos de distribución. Permite interacciones entre variables y da resultados probabilísticos.	Utiliza algoritmos automatizados para aprender iterativamente las relaciones entre las especies y las variables bioclimáticas, en los rangos de distribución. Los usuarios no realizar suposiciones sobre su relación, si no que son definidas por el algoritmo.	Utiliza el teorema de Bayes para describir las fuentes de incertidumbre en un modelo estadístico, en el que los parámetros se tratan como variables aleatorias con distribuciones previas. Los enfoques bayesianos se adaptan bien a datos ecológicamente complejos, de varios niveles, y se pueden aplicar de forma iterativa para aplicaciones de aprendizaje automático.
Métodos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Multilevel rectilinear envelope<sup>1</sup></li> <li>2. Binary convex hull envelope<sup>2</sup></li> <li>3. Fuzzy Envelope</li> <li>4. Continuous point-to-point similarity metric<sup>3</sup></li> <li>5. Ecological niche factor analysis<sup>4</sup></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Generalized linear models (GLM)<sup>5,6</sup></li> <li>2. Generalized additive models (GAM)<sup>5,7</sup></li> <li>3. Multivariate adaptive regression splines (MARS)<sup>8</sup></li> <li>4. Boosted Regression Trees (BRT)</li> <li>5. Zero-inflated models (Poisson; Negative Binomial)</li> <li>6. Hurdle Model</li> <li>7. GRASP<sup>9</sup></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Artificial neural networks (ANN)<sup>10</sup></li> <li>2. Random forests (RF)</li> <li>3. Maximum Entropy (MaxEnt)<sup>11</sup></li> <li>4. Genetic algorithms<sup>12</sup></li> <li>5. Flexible discriminant analysis</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hierarchical Species Distribution modelling</li> <li>2. Gaussian Random Fields<sup>13</sup></li> </ol>
Herramientas disponibles	<p>Para (1): BIOCLIM<sup>14</sup>, DIVA<sup>15</sup> y GARP<sup>16</sup></p> <p>Para (2): HABITAT2</p> <p>Para (3): DOMAIN<sup>17</sup> (gratuito)</p> <p>Para (4): BIOMAPPER<sup>18</sup> (gratuito)</p> <p>Para (5): ENFA<sup>19</sup></p>	<p>Para (1,2,3,4) usar plataforma BIOMOD2 con R<sup>20</sup></p> <p>ECOSPAT<sup>21</sup></p>	<p>Para (1): SPECIES (no gratuito); BIOMOD (gratuito)</p> <p>Para (2): BIOMOD</p> <p>Para (3): MAXENT (gratuito)<sup>22</sup>; Wallace Initiative<sup>23</sup>(gratuito)</p> <p>Para (4): GARP10</p>	Paquetes de R, por ejemplo Filzbach y GRaF
Requisitos de datos que cambian entre enfoques	Sólo datos puntuales de presencia; datos de ausencia pueden ayudar a mejorar las predicciones	Datos de presencia y pseudo-ausencia (contexto)	Datos de presencia y pseudo-ausencia (transfondo)	Datos de presencia y pseudo-ausencia (contexto)
Autores que utilizan este método	<p>Brereton et al., 1995</p> <p>(Beaumont et al., 2005)(BIOCLIM);</p> <p>(Kadmon et al., 2003)</p> <p>(Meynecke, 2004)</p> <p>(Levinsky et al., 2007)</p>	<p>Para (1): (Huntley et al., 2008) 2008 (Locally weighted regression); (Varela et al., 2009)</p> <p>Para (2): (Mitikka et al., 2007; Trivedi et al., 2008)</p> <p>Para (3): (Leathwick et al., 2006)</p> <p>Para (5): (Pacifi et al., 2015)</p>	<p>(Berry et al., 2003; Pearson, 2007)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. (Lawler et al., 2009)</li> <li>2. (Milanovich et al., 2010; Hof et al., 2012; Warren et al., 2013)</li> <li>3. (Warren et al., 2013)</li> <li>4. (Hughes et al., 2012)</li> <li>5. (Reside et al., 2012)</li> </ol>	<p>(Gelfand et al., 2006)</p> <p>(Latimer et al., 2006)</p> <p>(García-Valdés et al., 2015)</p> <p>(Golding &amp; Purse, 2016)</p>



## Apéndice Tabla B. Ejemplos de métodos que se han utilizado para aplicar un enfoque basado en rasgos biológicos al EVCC.

Métodos EVCC basados en rasgos biológicos		
Método	Cualitativo	Semicuantitativo
Cómo funciona	Los expertos puntúan o clasifican las especies de acuerdo con las categorías generalizadas. Estos métodos generalmente sólo se usan cuando una evaluación cuantitativa es inviable	El conjunto de rasgos biológicos y sus umbrales de vulnerabilidad son seleccionados por expertos. Los datos cuantitativos o cualitativos de los rasgos biológicos se utilizan para puntuar o clasificar las especies
Herramientas disponibles	SAVS (System for Assessing Vulnerability of Species to Climate Change);	Climate Change Vulnerability Index <sup>24</sup>
Requisitos de datos adicionales del enfoque	Datos de distribución no necesarios	Es posible que se requieran datos de distribución
Software necesario	Ninguno	Ninguno para América del Norte (ClimateWizard disponible). Algunos métodos requieren SIG
Experiencia requerida	Conocimiento profundo de la especie y su ecología	Conocimiento profundo de la especie y su ecología Rasgos biológicos Rangos de distribución de las especies
Autores que utilizan este método	(McNamara, 2010; Bagne et al., 2011; Advani, 2014)	(Chin et al., 2010; Graham et al., 2011; Young et al., 2012; Foden et al., 2013)

## Apéndice Tabla C. Ejemplos de métodos que se han utilizado para aplicar un enfoque mecanicista al EVCC. Lurgi et al. (2015) proporcionan una revisión reciente de los modelos mecanicistas y el software asociado disponibles, para simular las respuestas al cambio climático y proporcionar un árbol de decisión sobre la elección del modelo basado en los datos disponibles, las necesidades científicas y de conservación, y el organismo modelo.

Método	Modelos demográficos				Modelos mecanicistas de nicho	
	El resultado es abundancia; se puede utilizarse para calcular el riesgo de extinción				Proporciona predicciones de distribución de especies (frente a modelos correlativos que predicen un espacio climático adecuado)	
	Individuo como unidad en el modelo		Population or species as modelled unit		Nichos definidos por fisiología	Nichos definidos por el equilibrio energético
	No espacialmente explícito	Espacialmente explícito	No espacialmente explícito	Espacialmente explícito	Tolerancias típicamente definidas a partir del experimento u observación	Tolerancias definidas mediante ecuaciones de balance energético
Herramientas utilizadas (y su disponibilidad)	Vortex <sup>25</sup> (gratuito)	Hexsim <sup>26</sup> (gratuito)	Life tables (n.a.) RAMAS <sup>27</sup> (no gratuito)	RAMAS Metapop <sup>27</sup> RAMAS GIS <sup>27</sup> (no gratuito)	(ninguno disponible)	Niche Mapper <sup>28</sup> (bajo solicitud)
Ejemplo de uso	(Wells et al., 2015) (Serrano et al., 2015) (Naveda-Rodríguez et al., 2016)	(Carroll et al., 2004) (Schumaker et al., 2014) (Heinrichs et al., 2016)	(Stanton, 2014)	(Aiello-Lammens et al., 2011) (Fordham et al., 2013) (Bonebrake et al., 2014) (Swab et al., 2015)	(Monahan, 2009; Sunday et al., 2012; Overgaard et al., 2014)	(Kearney & Porter, 2009)
Forma en que se incluye CC	Influencia directa en los parámetros demográficos	Influencia directa en los parámetros demográficos e indirecta a través de los cambios en la idoneidad del hábitat	Influencia directa en los parámetros demográficos	Influencia directa en los parámetros demográficos e indirecta a través de los cambios en la idoneidad del hábitat	Influencia directa del bioclima en la fisiología, el desempeño o la supervivencia; influencia indirecta a través de los cambios en la idoneidad del hábitat	Usa ecuaciones de equilibrio energético para relacionar el bioclima con procesos metabólicos (por ejemplo, temperatura corporal o intercambio de agua). Estas relaciones se utilizan luego para predecir el desempeño y la supervivencia bajo alteraciones del bioclima.

## Apéndice Tabla D. Ejemplos de métodos que se han utilizado para aplicar un enfoque combinado la EVCC.

Método	<b>EVRB-Corr:</b> Enfoque basado en rasgos biológicos que incluye resultados de modelos correlativos	<b>Corr-EVRB 1:</b> Enfoque correlativo que utiliza distancias de dispersión	<b>Corr-EVRB 2:</b> Enfoque correlativo que considera la sensibilidad y la capacidad de adaptación	<b>Corr-Mec1:</b> Enfoque correlativo que considera la dinámica de la metapoblación y la idoneidad del hábitat	<b>Corr-Mec2:</b> Como Corr-Mech1, pero incluyendo interacciones interespecíficas	<b>Corr-Mec-EVRB:</b> Métodos basados en criterios
Cómo funciona	Utiliza modelos correlativos para estimar la exposición. El IVCC utiliza los resultados del modelo donde estén disponibles	Utiliza datos de dispersión para determinar la probabilidad de que las especies colonicen los rangos de distribución proyectados	Utiliza rasgos biológicos para identificar áreas susceptibles a sobrestimación o subestimación de distribución usando modelos correlativos	Las dinámicas de metapoblaciones y las variables que determinan la idoneidad del hábitat (por ejemplo, aumento del nivel del mar, incendios, estocasticidad) interactúan con un espacio climático cambiante	Como Corr-Mech1, pero incluye interacciones interespecíficas	Los criterios se utilizan para clasificar las especies en categorías de riesgo basándose en los resultados de los EVCC correlativos y/o mecanicistas. Pueden incluir datos de cambios en rasgos biológicos y especies observadas
Herramientas disponibles	El índice de vulnerabilidad del cambio climático (IVCC) <sup>29</sup>	Ninguno a parte de los de modelado correlativo	Ninguno a parte de los de modelado correlativo	RAMAS GIS <sup>30</sup> BIOMOVE	RAMAS GIS <sup>30</sup> (modelos para cada especie; después se los vinculan)	
Requisitos de datos adicionales del enfoque	Localidades puntuales	Distancias de dispersión	Datos de rasgos biológicos	Datos demográficos, variables apropiadas que describen la idoneidad del hábitat	Como Corr-Mech1, pero incluyendo interacciones interespecíficas	
Autores que utilizan este método	(Young et al., 2012) (Smith et al., 2016)	(Schloss et al., 2012) utiliza ecuaciones de dispersión con datos de rasgos biológicos (Warren et al., 2013) utiliza tasas de dispersión promedio del grupo taxonómico (Visconti et al., 2015) utilizar dispersión por generación	(Garcia et al., 2014)	(Keith et al., 2008) (Anderson et al., 2009; RAMAS GIS) (Midgley et al., 2010) (BIOMOVE) (Fordham et al., 2012)	(Harris et al., 2012) (Fordham et al., 2013)	(Thomas et al., 2011)

### Notas

- <sup>1</sup> (Busby, 1991)
- <sup>2</sup> (Walker & Cocks, 1991)
- <sup>3</sup> (Carpenter et al., 1993)
- <sup>4</sup> (Hirzel et al., 2002)
- <sup>5</sup> (Guisan et al., 2002)
- <sup>6</sup> (McCullagh & Nelder, 1989)
- <sup>7</sup> (Hastie & Tibshirani, 1990)
- <sup>8</sup> (Elith & Leathwick, 2007)
- <sup>9</sup> (Lehmann et al., 2002)
- <sup>10</sup> (Pearson et al., 2002)
- <sup>11</sup> (Phillips et al., 2006)
- <sup>12</sup> (Stockwell & Peters, 1999)
- <sup>13</sup> (Golding & Purse, 2016)
- <sup>14</sup> <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=AU9103158>

- <sup>15</sup> <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=QP2007000038>
- <sup>16</sup> [http://lifemapper.org/?page\\_id=99](http://lifemapper.org/?page_id=99)
- <sup>17</sup> [http://www.cifor.cgiar.org/docs/\\_ref/research\\_tools/domain/](http://www.cifor.cgiar.org/docs/_ref/research_tools/domain/) and <http://diva-gis.org>
- <sup>18</sup> <http://www2.unil.ch/biomapper/>
- <sup>19</sup> <http://www2.unil.ch/biomapper/enfa.html>
- <sup>20</sup> <https://cran.r-project.org/web/packages/biomod2/biomod2.pdf>
- <sup>21</sup> <https://www.unil.ch/ecospat/home/menuguid/ecospat-resources/tools.html>
- <sup>22</sup> <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>
- <sup>23</sup> <http://wallaceinitiative.org/>

- <sup>24</sup> <https://connect.natureserve.org/science/climate-change/ccvi>
- <sup>25</sup> <http://vortex10.org/Vortex10.aspx>
- <sup>26</sup> <http://www.hexsim.net/>
- <sup>27</sup> <https://www.ramas.com/ramas.htm>
- <sup>28</sup> <http://zoology.wisc.edu/faculty/por/por.html#niche>
- <sup>29</sup> <http://www.natureserve.org/conservation-tools/climate-change-vulnerability-index>
- <sup>30</sup> <https://www.ramas.com/ramas.htm>

## Referencias apéndice

- Advani NK (2014) *WWF: Climate Change Vulnerability Assessment for Species*. Washington D.C., 1–5 pp.
- Aiello-Lammens ME, Chu-Agor ML, Convertino M, Fischer RA, Linkov I, Akçakaya RH (2011) The impact of sea-level rise on Snowy Plovers in Florida: integrating geomorphological, habitat, and metapopulation models. *Global Change Biology*, **17**, 3644–3654.
- Anderson BJ, Akçakaya HR, Araújo MB, Fordham DA, Martinez-Meyer E, Thuiller W, Brook BW (2009) Dynamics of range margins for metapopulations under climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **276**, 1415–20.
- Bagne KE, Friggens MM, Finch DM, Karen E, Megan M, System DMA (2011) *A System for Assessing Vulnerability of Species (SAVS) to Climate Change*. Rocky Mountain Research Station, 28 pp.
- Beaumont LJ, Hughes L, Poulsen M (2005) Predicting species distributions: use of climatic parameters in BIOCLIM and its impact on predictions of species' current and future distributions. *Ecological Modelling*, **186**, 251–270.
- Berry PM, Dawson TP, Harrison PA, Pearson R, Butt N (2003) The sensitivity and vulnerability of terrestrial habitats and species in Britain and Ireland to climate change. *Journal for Nature Conservation*, **23**, 15–23.
- Bonebrake TC, Syphard AD, Franklin J *et al.* (2014) Fire management, managed relocation, and land conservation options for long-lived obligate seeding plants under global changes in climate, urbanization, and fire regime. *Conservation Biology*, **28**, 1057–1067.
- Brereton R, Bennett S, Mansergh I (1995) Enhanced greenhouse climate change and its potential effect on selected fauna of south-eastern Australia: a trend analysis. *Biological Conservation*, **72**, 339–354.
- Busby JR (1991) BIOCLIM – a bioclimatic analysis and prediction system. In: *Nature Conservation: Cost Effective Biological Surveys and Data Analysis* (eds Margules CR, Austin MP), pp. 64–68. CSIRO, East Melbourne, Australia.
- Carpenter G, Gillison AN, Winter J (1993) DOMAIN: a flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals. *Biodiversity and Conservation*, **2**, 667–680.
- Carroll C, Noss RF, Paquet PC, Schumaker NH (2004) Extinction Debt of Protected Areas in Developing Landscapes. *Conservation Biology*, **18**, 1110–1120.
- Chin A, Kyne PM, Walker TI, McAuley RB (2010) An integrated risk assessment for climate change: analysing the vulnerability of sharks and rays on Australia's Great Barrier Reef. *Global Change Biology*, **16**, 1936–1953.
- Elith J, Leathwick J (2007) Predicting species distributions from museum and herbarium records using multiresponse models fitted with multivariate adaptive regression splines. *Diversity and Distributions*, **13**, 265–275.
- Foden WB, Butchart SHM, Stuart SN *et al.* (2013) Identifying the World's Most Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians and Corals. *PLoS One*, **8**, e65427.
- Fordham DA, Resit Akçakaya H, Araújo MB *et al.* (2012) Plant extinction risk under climate change: Are forecast range shifts alone a good indicator of species vulnerability to global warming? *Global Change Biology*, **18**, 1357–1371.
- Fordham DA, Akçakaya HR, Brook BW *et al.* (2013) Adapted conservation measures are required to save the Iberian lynx in a changing climate. *Nature Climate Change*, 3–7.
- García RA, Araújo MB, Burgess ND, Foden WB, Gutsche A, Rahbek C, Cabeza M (2014) Matching species traits to projected threats and opportunities from climate change (ed Guilhaumon F). *Journal of Biogeography*, **41**, 724–735.
- García-Valdés R, Gotelli NJ, Zavala MA, Purves DW, Araújo MB (2015) Effects of climate, species interactions, and dispersal on decadal colonization and extinction rates of Iberian tree species. *Ecological Modelling*, **309–310**, 118–127.
- Gelfand AE, Silander JA, Wu S, Latimer A, Lewis PO, Rebelo A, Holder M (2006) Explaining Species Distribution Patterns through Hierarchical Modeling. *Bayesian Analysis*, **1**, 41–92.
- Golding N, Purse B V. (2016) Fast and flexible Bayesian species distribution modelling using Gaussian processes. *Methods in Ecology and Evolution*.
- Graham NAJ, Chabanet P, Evans RD *et al.* (2011) Extinction vulnerability of coral reef fishes. *Ecology Letters*, **14**, 341–8.
- Guisan A, Edwards TC, Hastie T (2002) Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling*, **157**, 89–100.
- Harris JBC, Fordham DA, Mooney PA *et al.* (2012) Managing the long-term persistence of a rare cockatoo under climate change. *Journal of Applied Ecology*, **49**, 785–794.
- Hastie T, Tibshirani RJ (1990) *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall/CRC, London, 352 pp.
- Heinrichs JA, Lawler JJ, Schumaker NH (2016) Intrinsic and extrinsic drivers of source-sink dynamics. *Ecology and Evolution*, **6**, 892–904.
- Hirzel AHH, Hausser JH, Chessel DC, Perrin N (2002) Ecological-niche factor analysis: how to compute habitat-suitability maps without absence data? *Ecology*, **83**, 2027–2036.
- Hof AR, Jansson R, Nilsson C (2012) Future climate change will favour non-specialist mammals in the (sub)arctics. *PLoS One*, **7**, e52574.
- Hughes AC, Satasook C, Bates PJJ, Bumrungsri S, Jones G (2012) The projected effects of climatic and vegetation changes on the distribution and diversity of Southeast Asian bats. *Global Change Biology*, **18**, 1854–1865.
- Huntley B, Collingham YC, Willis SG, Green RE (2008) Potential impacts of climatic change on European breeding birds. *PLoS One*, **3**, e1439.
- Kadmon R, Farber O, Danin A (2003) A systematic analysis of factors affecting the performance of climatic envelope models. *Ecological Applications*, **13**, 853–867.
- Kearney M, Porter W (2009) Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology letters*, **12**, 334–50.
- Keith DA, Akçakaya HR, Thuiller W *et al.* (2008) Predicting extinction risks under climate change: coupling stochastic population models with dynamic bioclimatic habitat models. *Biology Letters*, **4**, 560–3.
- Latimer AM, Wu S, Gelfand AE, Silander J a (2006) Building statistical models to analyze species distributions. *Ecological applications: a publication of the Ecological Society of America*, **16**, 33–50.
- Lawler JJ, Shafer SL, Bancroft B a, Blaustein AR (2009) Projected climate impacts for the amphibians of the Western hemisphere. *Conservation biology: the journal of the Society for Conservation Biology*, **24**, 38–50.
- Leathwick JR, Elith J, Hastie T (2006) Comparative performance of generalized additive models and multivariate adaptive regression splines for statistical modelling of species distributions. *Ecological Modelling*, **199**, 188–196.
- Lehmann A, Overton JM, Leathwick JR (2002) GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction. *Ecological Modelling*, **157**, 189–207.
- Levinsky I, Skov F, Svenning J-C, Rahbek C (2007) Potential impacts of climate change on the distributions and diversity patterns of European mammals. *Biodiversity and Conservation*, **16**, 3803–3816.
- Lurgi M, Brook BW, Salter F, Fordham DA (2015) Modelling range dynamics under global change: Which framework and why? *Methods in Ecology and Evolution*, **6**, 247–256.
- McCullagh P, Nelder JA (1989) *Generalized Linear Models*, 2nd edn. Chapman & Hall/CRC, London, 532 pp.
- McNamara A (2010) *Climate Change Vulnerability of Migratory Species*. London, 224 pp.
- Meynecke J-O (2004) Effects of global change on geographic distributions of vertebrates in North Queensland Effects of global climate change on geographic distributions of vertebrates in North Queensland. *Ecological Modelling*, **174**, 347–357.



- Midgley GF, Davies ID, Albert CH *et al.* (2010) BioMove - an integrated platform simulating the dynamic response of species to environmental change. *Ecography*, **33**, 612–616.
- Milanovich JR, Peterman WE, Nibbelink NP, Maerz JC (2010) Projected loss of a salamander diversity hotspot as a consequence of projected global climate change. (ed Wright J). *PloS One*, **5**, e12189.
- Mitikka V, Heikkinen RK, Luoto M, Araújo MB, Saarinen K, Pöyry J, Fronzek S (2007) Predicting range expansion of the map butterfly in Northern Europe using bioclimatic models. *Biodiversity and Conservation*, **17**, 623–641.
- Monahan WB (2009) A mechanistic niche model for measuring species' distributional responses to seasonal temperature gradients. *PloS One*, **4**, e7921.
- Naveda-Rodríguez A, Vargas FH, Kohn S, Zapata-Ríos G (2016) Andean Condor (*Vultur gryphus*) in Ecuador: Geographic Distribution, Population Size and Extinction Risk. *PloS One*, **11**, e0151827.
- Overgaard J, Kearney MR, Hoffmann AA (2014) Sensitivity to thermal extremes in Australian *Drosophila* implies similar impacts of climate change on the distribution of widespread and tropical species. *Global change biology*, **20**, 1738–50.
- Pacifici M, Visconti P, Scepì E, Hausmann A, Attorre F, Grant R, Rondinini C (2015) Fire policy optimization to maximize suitable habitat for locally rare species under different climatic conditions: A case study of antelopes in the Kruger National Park. *Biological Conservation*, **191**, 313–321.
- Pearson RG (2007) *Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners*. New York, 1–50 pp.
- Pearson RG, Dawson TP, Berry PM, Harrison PA (2002) SPECIES: a spatial evaluation of climate impact on the envelope of species. *Ecological Modelling*, **154**, 289–300.
- Phillips S, Anderson R, Schapire R (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190**, 231–259.
- Reside AE, VanDerWal J, Kutt AS (2012) Projected changes in distributions of Australian tropical savanna birds under climate change using three dispersal scenarios. *Ecology and Evolution*, **2**, 705–718.
- Schloss CA, Nuñez TA, Lawler JJ (2012) Dispersal will limit ability of mammals to track climate change in the Western Hemisphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **2012**.
- Schumaker NH, Brookes A, Dunk JR *et al.* (2014) Mapping sources, sinks, and connectivity using a simulation model of northern spotted owls. *Landscape Ecology*, **29**, 579–592.
- Serrano E, Colom-Cadena A, Gilot-Fromont E *et al.* (2015) Border Disease Virus: An Exceptional Driver of Chamois Populations Among Other Threats. *Frontiers in Microbiology*, **6**, 1–9.
- Smith AB, Long QG, Albrecht MA (2016) Shifting targets: spatial priorities for ex situ plant conservation depend on interactions between current threats, climate change, and uncertainty. *Biodiversity and Conservation*, **25**, 905–922.
- Stanton JC (2014) Present-day risk assessment would have predicted the extinction of the passenger pigeon (*Ectopistes migratorius*). *Biological Conservation*, **180**, 11–20.
- Stockwell D, Peters D (1999) The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, **13**, 143–158.
- Sunday JM, Bates AE, Dulvy NK (2012) Thermal tolerance and the global redistribution of animals. *Nature Climate Change*, **2**, 686–690.
- Swab RM, Regan HM, Matthies D, Becker U, Bruun HH (2015) The role of demography, intra-species variation, and species distribution models in species' projections under climate change. *Ecography*, **38**, 221–230.
- Thomas CD, Hill JK, Anderson BJ *et al.* (2011) A framework for assessing threats and benefits to species responding to climate change. *Methods in Ecology and Evolution*, **2**, 125–142.
- Trivedi MR, Berry PM, Morecroft MD, Dawson TP (2008) Spatial scale affects bioclimate model projections of climate change impacts on mountain plants. *Global Change Biology*, **14**, 1089–1103.
- Varela S, Rodríguez J, Lobo JM (2009) Is current climatic equilibrium a guarantee for the transferability of distribution model predictions? A case study of the spotted hyena. *Journal of Biogeography*, **36**, 1645–1655.
- Visconti P, Bakkenes M, Baisero D *et al.* (2015) Projecting Global Biodiversity Indicators under Future Development Scenarios. *Conservation Letters*, **9**, 5–13.
- Walker PA, Cocks KD (1991) HABITAT: a procedure for modelling a disjoint environmental envelope for a plant or animal species. *Global Ecol. Biogeog. Lett.*, **1**, 108–18.
- Warren R, VanDerWal J, Price J *et al.* (2013) Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Climate Change*, **3**, 678–682.
- Wells K, Brook BW, Lacy RC *et al.* (2015) Timing and severity of immunizing diseases in rabbits is controlled by seasonal matching of host and pathogen dynamics. *J R Soc Interface*, **12**, 20141184.
- Young BE, Hall KR, Byers E, Gravuer K, Hammerson G, Redder A, Szabo K (2012) Rapid assessment of plant and animal vulnerability to climate change. In: *Conserving Wildlife Populations in a Changing Climate* (eds Brodie J, Post E, Doak D), pp. 129–150. University of Chicago Press, Chicago, IL.









**UNIÓN INTERNACIONAL PARA LA  
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA**

OFICINA CENTRAL MUNDIAL  
Rue Mauverney 28  
1196 Gland, Switzerland  
Tel: +41 22 999 0000  
Fax: +41 22 999 0002

[www.iucn.org/es](http://www.iucn.org/es)