

Impacto del Cambio Climático en la Biodiversidad e Implicaciones para las Soluciones Basadas en la Naturaleza

Cor A. Schipper, Titus W. Hielkema y Alexander Ziemba

Síntesis

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) proporciona evaluaciones científicas periódicas sobre el cambio climático, sus implicaciones y los posibles riesgos futuros basados en matrices energéticas estimadas y trayectorias políticas. El objetivo de esta publicación es evaluar los riesgos que el cambio climático plantea para la biodiversidad utilizando escenarios climáticos proyectados por el IPCC para el período 2081-2100, combinados con indicadores clave de sensibilidad de las especies y variables como respuesta a las proyecciones del cambio climático. Al hacerlo, abordamos cómo las presiones provocadas por el cambio climático pueden afectar a la biodiversidad. Además, una novedosa relación causal entre los niveles extremos de exposición a la temperatura ambiente y los efectos correspondientes en las especies individuales, señalada en este documento como el Límite Superior de Tolerancia Térmica y la Distribución de Sensibilidad de las Especies (LSTT-DSE en inglés), proporciona una explicación convincente de cómo el calentamiento global afecta a la biodiversidad. Nuestro estudio indica que los sitios de América del Norte y Oceanía con climas continentales y subtropicales húmedos, respectivamente, están a punto de experimentar cambios de temperatura que se han identificado como posibles desencadenantes clave de puntos de inflexión. El estrés térmico puede afectar significativamente a aproximadamente el 60-90 % de los mamíferos, el 50 % de las aves y el 50 % de los anfibios en los sitios de América del Norte y Oceanía durante períodos que van de 5 a 84 días al año a partir de 2080. En el clima oceánico templado húmedo de los sitios europeos, las condiciones climáticas permanecen relativamente estables; sin embargo, se han identificado efectos acumulativos moderados sobre la biodiversidad, y existen perfiles adicionales de amenazas a la biodiversidad que los representan. Tanto la integración de los perfiles IPCC-UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) como la relación de respuesta LSTT-DSE para las comunidades de especies consideradas han dado como resultado la identificación de las amenazas proyectadas que las presiones climáticas pueden imponer bajo los escenarios considerados por el IPCC, lo que resultaría en la degradación de la biodiversidad. Las respuestas LSTT-DSE



Foto de [Boston Public Library](#) en [Unsplash](#)

desarrolladas pueden utilizarse para resaltar posibles rupturas entre los niveles tróficos en las estructuras de la red alimentaria, destacando un elemento crítico adicional a la hora de abordar las preocupaciones sobre la biodiversidad y los ecosistemas.

Introducción

Comprender los impactos localizados de las proyecciones del cambio climático en los ecosistemas es de suma importancia para las estrategias de conservación de la naturaleza que buscan adaptarse a los procesos climáticos locales [1]. El aumento del estrés relacionado con el calor puede tener diversos efectos, como el aumento de las tasas metabólicas, cambios de comportamiento o mortalidad [2,3,4,5]. Las posibles consecuencias del cambio climático en la biodiversidad a largo plazo y las fases de transición a medio plazo son insuficientemente conocidas [6]. La literatura confirma que las predicciones a medio y largo plazo sobre los efectos de las presiones climáticas sobre la biodiversidad, a escala local y regional, muestran interacciones complejas, múltiples conductores de cambio e implican complejas redes alimentarias con variaciones espaciales en los ecosistemas [7,8,9,10,11,12,13] (Tabla A1). Las condiciones climáticas cambiantes son causadas por múltiples factores y presiones bioclimáticas agravantes [14], como el aumento de la temperatura y los cambios en el ciclo del agua. Los factores de estrés combinados de la sequía y las olas de calor extremo, según lo predicho por los modelos de escenarios climáticos, podrían tener un impacto alto, y a menudo negativo, en la fisiología de los organismos [15,16,17]. La referencia [18] mostró que, si la variación monitoreada en los niveles de tolerancia térmica de las especies continúa, las respuestas de adaptación natural en los límites térmicos de los organismos tendrán un potencial limitado para servir como estrategia de adaptación para la preservación de la mayoría de las especies. Esto tiene especial relevancia, dada la velocidad sin precedentes del cambio climático contemporáneo. El cambio potencial resultante del régimen ecológico, denotado por impactos observados como puntos de inflexión en los conductores bioclimáticos externos y las respuestas de los ecosistemas, puede causar un cambio importante en la estructura y/o función de los ecosistemas [19]. La referencia [20] utilizó la teoría de las catástrofes para detectar un cambio de régimen para las especies marinas; al hacerlo, concluyó que el calentamiento de los océanos causará cambios de régimen potencialmente irreversibles en los ecosistemas a escala global. Un mecanismo que podría reducir el riesgo de sobrecalentamiento es la tolerancia térmica fisiológica, como el cambio reversible conocido como aclimatación [21]. Además, la exposición de los ectotermos al estrés térmico combinado y a la sequía puede exacerbar el estrés fisiológico de los organismos a través de efectos aditivos [22,23]. Dada la probabilidad de que aumenten los factores de estrés térmico individuales y combinados con una trayectoria limitada para la adaptación de las especies, sobre todo teniendo en cuenta la tasa de cambio prevista, se presta especial atención a estos elementos en esta aplicación.

Dado que existe un potencial considerable de cambios graves en la composición de la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas debido al cambio climático, es necesario evaluar el progreso de la adaptación climática en las zonas de conservación de la naturaleza, lo que da lugar a una solución basada en la naturaleza (SBN) aplicada [24,25]. Algunos de estos estudios consideran indicadores ecológicos para evaluar el potencial de conservación de la biodiversidad. Varios autores han desarrollado estimaciones sobre los efectos potenciales de las presiones climáticas proyectadas sobre los ecosistemas [7,26,27,28,29]. La referencia [30] desarrolló un modelo para evaluar la eficiencia de las SBN mediante el acoplamiento de las proyecciones bioclimáticas locales del IPCC con los planes de gestión de los sitios de las SBN. Esta aplicación utilizó los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas con fines de medición y evaluación [31].

Se dispone de metodologías fácilmente aplicables para evaluar los niveles de vulnerabilidad de la biodiversidad a las presiones bioclimáticas previstas, en particular las que pueden dar cuenta de las soluciones de resiliencia climática y las estrategias de adaptación. Sin embargo, hasta donde sabemos, los estudios de la literatura existente no han intentado realizar un análisis de las SbN basado en las amenazas existentes para la biodiversidad y las proyecciones bioclimáticas a largo plazo para el período 2081-2100, la aplicación principal considerada en este trabajo. A medida que los fenómenos extremos se vuelven más comunes e intensos, la investigación de las evaluaciones globales del cambio climático en relación con el estrés térmico extremo, la sequía y los episodios de precipitación requiere conjuntos de datos clave recopilados de fuentes científicas, y que estos datos se consideren cuidadosamente en futuras evaluaciones de riesgos de modelos [32,33,34].

Nuestro estudio muestra la nueva relación entre el límite superior de tolerancia térmica y la distribución de la sensibilidad de las especies (LSTT-DSE), donde las temperaturas críticas proporcionan información convincente sobre cómo el cambio climático puede afectar a la biodiversidad. Este análisis tiene como objetivo evaluar la eficacia de los sitios de SbN mediante la mejora de un modelo de impacto, la incorporación de las amenazas locales de la biodiversidad de la UICN a los vertebrados e invertebrados, y el establecimiento de conexiones con las proyecciones bioclimáticas del IPCC. Esto se suma al conjunto de pruebas relativas al papel que desempeña una SbN en las estrategias de adaptación en relación con las crecientes presiones bioclimáticas asociadas a las amenazas climáticas a la biodiversidad.

En el ámbito de este documento, consideramos la biodiversidad en sentido general, entendiéndola que abarca la diversidad de especies, así como los elementos estructurales y funcionales dentro de los sistemas ecológicos. Se reconoce que las evaluaciones de la biodiversidad son intrínsecamente complejas y se basan en una comprensión intrincada de la composición y las relaciones de los ecosistemas, y este estudio no profundiza en los matices de los ecosistemas considerados. En nuestro análisis, el término biodiversidad se utiliza para indicar un punto final para las presiones y los conductores del sistema de cambio climático y las influencias de SbN, que están relacionados con la diversidad de especies y las implicaciones estructurales o funcionales en los sistemas ecológicos. Como tal, la biodiversidad se define como la diversidad o riqueza dentro de las especies, entre especies, o del hábitat y los ecosistemas, en línea con la definición de la CIDB (Convención Internacional sobre la Diversidad Biológica).

En nuestro artículo, se utilizan las variables bioclimáticas del IPCC y los datos espaciales de la UICN para (1) analizar los sitios SbN globales y los aumentos proyectados en las variables bioclimáticas en los sistemas de clasificación climática, centrándose en la temperatura media anual, las olas de calor (es decir, días más cálidos de 35 °C y 40 °C al año), precipitación máxima de 5 días, días secos consecutivos y aumento del nivel del mar; (2) juzgar el impacto de los procesos bioclimáticos en la biodiversidad en diferentes zonas climáticas y en múltiples niveles tróficos; y (3) obtener evidencia del papel que desempeñan las SbN en la adaptación al cambio climático teniendo en cuenta la biodiversidad. Los resultados y las medidas de impacto de esta evaluación pueden utilizarse para informar los procesos de planificación, mejorar y aumentar la resiliencia, o promover medidas para la conservación de la biodiversidad. Se utilizan sitios de SbN de Europa, Oceanía y América del Norte, con varias regiones globales representadas en la base de datos que se está desarrollando, y se demuestra que tienen una variedad de impactos.

Metodología

Los criterios de selección de los sitios de SbN considerados se basan principalmente en el deseo de mantener la similitud y la comparabilidad. Los criterios se basaron en sus funcionalidades, a saber, proporcionar protección contra

las inundaciones, servir al crecimiento socioeconómico, poseer un alto valor intrínseco para la biodiversidad y los ecosistemas saludables, regular las emisiones, reducir la erosión y servir al bienestar de los seres humanos [30]. Se han seleccionado cuatro zonas climáticas de Köppen-Geiger para la actualidad (1980-2016) [35]. Estos se encuentran en Europa, Oceanía y América del Norte [36,37,38], Figura A1. Esto se realizó reconociendo que los ecosistemas tropicales son los más vulnerables al cambio climático y probablemente sufrirán los mayores impactos. La integración de los perfiles de amenazas locales con los cambios bioclimáticos proyectados permite una planificación eficaz de la conservación de la naturaleza y la adaptación al clima en el sitio de SbN.

El estado de flujo del procesamiento y análisis de datos en el modelo propuesto de Impacto Bioclimático-Biodiversidad (IBB) se describe en la Figura 1, y consta de tres pasos metodológicos. El paso 1 consiste en construir el Sexto Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados del IPCC (IPCC CMIP6) [39], las amenazas a la biodiversidad de la UICN [40] y los conjuntos de datos GlobTherm [18,41] para los sitios.

En el paso 2, se analizan las amenazas actuales a la biodiversidad de la UICN para las zonas climáticas pertinentes con el fin de crear un mapa de sensibilidad de la biodiversidad, que luego se evalúa en el contexto de las proyecciones del

Modelo de Impacto de Biodiversidad Bioclimática

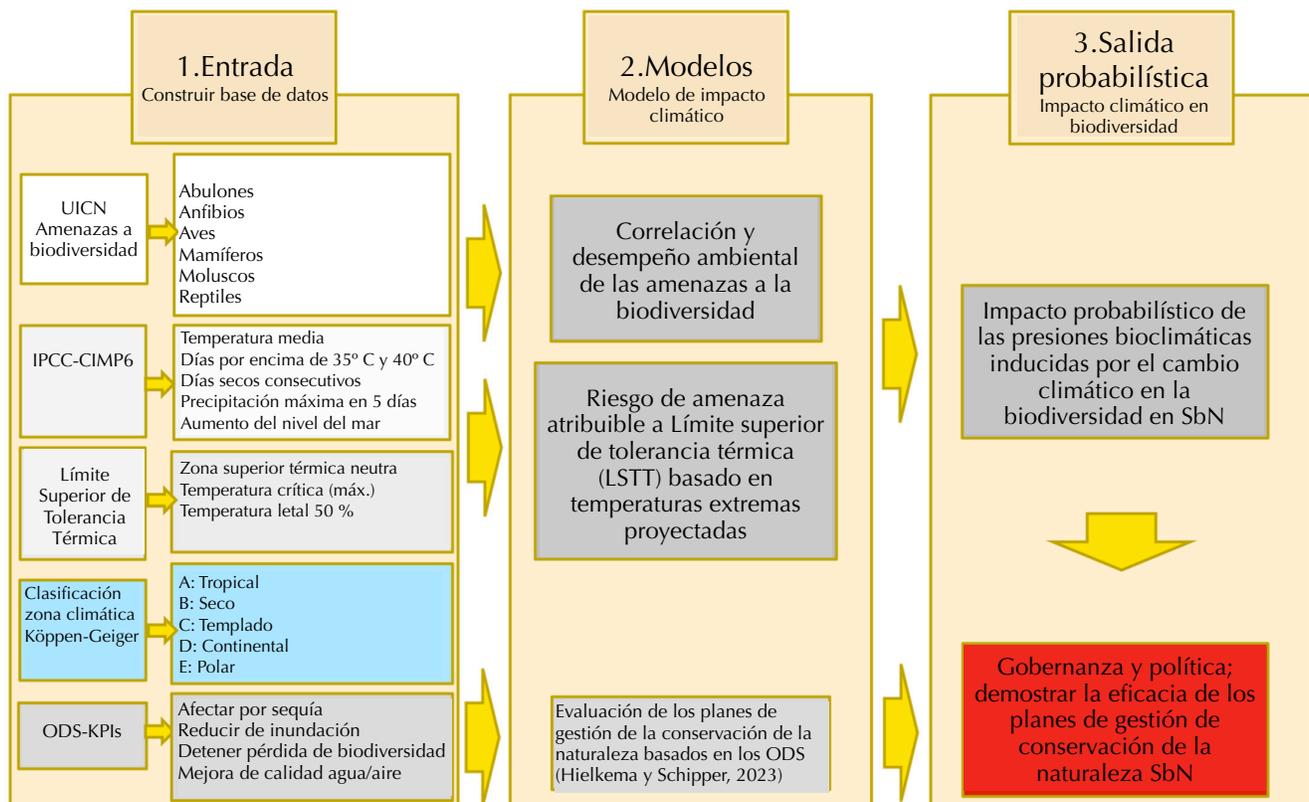


Figura 1. Esquematación del modelo IBB. El diagrama describe el flujo de datos procesados a partir de la variable inducida por el cambio climático del IPCC sobre la amenaza a la biodiversidad de la UICN utilizada para evaluar la posible degradación de la biodiversidad y los sitúa en relación con las vulnerabilidades locales para demostrar la eficacia de los planes de gestión en las proyecciones de la zona climática de Köppen-Geiger para 2081-2100 [30].

IPCC en los escenarios de emisiones SSP1-2.6 y SSP5-8.5. Además, se analizan los datos de GlobTherm para construir la fracción potencialmente afectada (FPA) de grupos de especies a temperaturas extremas utilizando la relación de respuesta sigmoide de límite superior de tolerancia térmica y distribución de sensibilidad de especies (LSTT-DSE) [42,43].

En el paso 3, las previsiones de resultados probabilísticos se producen mediante correlaciones, puntos de inflexión e interacciones de la red alimentaria para los conductores bioclimáticos externos para especies seleccionadas por región. Proporciona información sobre la posible degradación de la biodiversidad en los sitios de SbN y los clasifica en relación con las amenazas y vulnerabilidades locales de la biodiversidad, demostrando la eficacia de los planes de gestión en las proyecciones de zonas climáticas para 2081-2100. Por último, la relación IPCC-DSE demuestra la eficacia de los planes de gestión, teniendo en cuenta las proyecciones bioclimáticas.

2.1. Creación de los Conjuntos de Datos

Las predicciones del modelo del IPCC se basan en cinco escenarios, dos de los cuales se utilizan en este trabajo, a saber, los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5. El escenario SSP1-2.6 representa bajas emisiones de gases de efecto invernadero y emisiones de CO₂ que disminuyen a cero neto alrededor de 2050 o después, seguidas de emisiones netas negativas de CO₂ a nivel mundial. El escenario SSP5-8.5 representa emisiones de gases de efecto invernadero muy altas y emisiones de CO₂ de aproximadamente el doble de los niveles actuales para 2050 [39]. La utilización de las trayectorias de emisiones inferiores y superiores permite una evaluación exhaustiva de todo el espectro de escenarios del IPCC e identificar todas las áreas amenazadas en las situaciones más favorables y más desfavorables. El IPCC ofrece datos espaciales del CMIP6 para una serie de variables bioclimáticas, dominios temporales (tanto datos históricos como proyecciones) y trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) [44]. Se recopilaron datos bioclimáticos para la temperatura media anual (en grados °C), días más cálidos que 35 °C y 40 °C al año (sesgos ajustados mediante el método ISIMIP3 [45]), precipitación máxima de 5 días (en mm), días secos consecutivos (DSC) y aumento del nivel del mar (SLR; en metros). Además de los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5, se recopilaron datos bioclimáticos para los períodos de referencia 1850-1900 (para la temperatura media) y 1995-2014 (para precipitaciones, sequía y aumento del nivel del mar). Estos datos se recopilaron como promedios sobre la superficie del sitio SbN. A partir de los conjuntos de datos de referencia y de proyección, se calcularon manualmente los cambios en las variables bioclimáticas entre periodos.

Se elaboraron perfiles de amenazas a la biodiversidad local, basados en los datos espaciales de amenazas a la biodiversidad de la UICN y los límites de tolerancia térmica de las especies. En primer lugar, la UICN proporciona datos espaciales sobre las especies amenazadas y las amenazas directas a las especies. La UICN relaciona las amenazas para diferentes grupos de especies con las presiones bioclimáticas a través del Esquema de Clasificación de Amenazas de la UICN (versión 3.3. consultada el 8 de marzo de 2022 <https://www.iucnredlist.org/resources/threat-classification-scheme>) [40]. Los principales factores que se tienen en cuenta en este estudio son los aumentos y extremos de temperatura, las tormentas y las inundaciones pluviales, las sequías y el cambio y la alteración del hábitat (incluido el aumento del nivel del mar; Tabla A2). Los datos de la UICN se modificaron en el mismo proceso descrito por [46,47] y se utilizaron para generar un mapa espacial de sensibilidad de la biodiversidad. Siguiendo los datos de distribución de especies de la UICN [40], las especies se seleccionaron en función de la superposición de su distribución con las coordenadas de los sitios de SbN considerados. Además, las especies debían calificarse como existentes, nativas y residentes, de modo que se excluyeran las especies invasoras. Esto garantizó que las especies no adaptadas a las condiciones climáticas locales no fueran evaluadas y no sesgaran la evaluación de los ecosistemas nativos. Se seleccionaron diez grupos de especies clave que desempeñan un papel central en varios servicios ecosistémicos, a saber, anfibios [48]; aves, peces y

mamíferos [49]; reptiles, insectos y arácnidos [21]; y, por último, abulones y conus para las zonas costeras o moluscos para las cuencas fluviales [50]. La sensibilidad de los conjuntos de biodiversidad a las presiones bioclimáticas se evaluó en función del recuento de especies locales amenazadas por la presión bioclimática.

En segundo lugar, se utilizó la base de datos GlobTherm [18,40], que representa un conjunto de datos compuesto por los límites de tolerancia térmica de las especies a nivel mundial. El conjunto de datos consta de organismos

marinos, de agua dulce y terrestres y evalúa el impacto ecológico de la temperatura en Oceanía, América del Norte y Europa. Los datos abarcan biomas terrestres, marinos, de agua dulce y de agua salobre, que representan 10 grupos taxonómicos. A continuación, se definió el límite superior de tolerancia térmica (LSTT) considerando la medida de tolerancia térmica superior que permite la mayor cobertura de taxones. Los límites considerados fueron la zona térmica neutra superior (ZTNS), el máximo térmico crítico (CTmax) o la temperatura letal para el 50 % (LT50), dependiendo del grupo de especies. La ZTNS y la CTmax describen temperaturas críticas a las que se pierden funciones ecológicas clave, como la locomoción y la capacidad de obtener nutrientes o mantener el metabolismo basal para las ZTNS (solo aplicable a los endotermos). LT50 describe las temperaturas letales a las que se produce la mortalidad en el 50 % de los individuos, donde la mortalidad se considera la muerte de todo el individuo o de una parte del mismo, como la muerte de las hojas de un árbol [40]. Se seleccionaron puntos de datos ZTNS para las zonas climáticas (para el período 1980-2016) de los sitios SbN por continente (Tabla 1).

Continentes	Sitios SbN	Clasificación Köppen-Geiger	
		1980-2016	2081-2100
Norteamérica	Long Beach Island	Dfa	Cfa
	Springhouse Runs	Dfa/Cfa	Cfa
	Mill River Taunton	Dfa	Cfa
	Upper Mississippi River	Dfa/Dfb	Cfa/Dfa
Oceanía	Tomago Wetland AS	Cfb/Dfa	Cfa/Cfb
	Taumanu NZ	Cfb	Cfa/Cfb
Europa	Zwin	Cfb	Cfb/Cfa
	Weijerswold	Cfb	Cfb
	Lower Saxony	Cfb	Cfb
	Medway	Cfb	Cfb
	Ringkobing fjord	Cfb	Cfb
	Klarälven Värmland	Dfb	Cfb/Dfb

Tabla 1. Resumen de las zonas climáticas en los sitios SbN en 1980-2016 y 2081-2100 según el esquema de clasificación climática de Köppen-Geiger. Abreviaturas: Dfa = clima continental húmedo con verano caluroso; Dfb = clima continental húmedo con verano cálido; Cfa = zonas de clima subtropical húmedo; Cfb = zonas de clima oceánico templado. Los diferentes colores muestran los cambios en las zonas en el siglo XXI.

2.2. Modelo de Impacto Climático

2.2.1. Límite superior de tolerancia térmica y relación especie-sensibilidad-respuesta

En el segundo paso del modelo IBB, se pueden evaluar los efectos adversos relevantes de las amenazas emergentes para una fracción potencialmente afectada (FPA) de especies [51,52]. Dado que la FPA incluye la variación de sensibilidad entre todas las especies analizadas, proporciona una indicación más relevante desde el punto de vista ecológico del riesgo de una presión ambiental. Este enfoque se aleja de una evaluación binaria de «riesgo» o «sin riesgo» para las especies más sensibles, y aborda más bien la probabilidad de que se predigan diferentes efectos basados en un análisis estadístico de todas las especies probadas [42]. En nuestro estudio, el FPA de las especies se convirtió en curvas DSE para utilizar las relaciones causales entre el nivel de exposición a la temperatura y los efectos observados para especies individuales. El paquete SSDTOOLS se utilizó para trazar curvas DSE en el programa estadístico R versión 4.2.2 [53], y la curva representa el mejor ajuste de los datos a la función sigmoide [54,55,56]. Las curvas DSE constan de al menos seis especies; si esto no era posible, se omitía la curva DSE. A partir de estos cálculos de la curva DSE, la sensibilidad del límite superior de tolerancia térmica de los puntos de inflexión de las especies se obtuvo como el porcentaje de especies amenazadas por encima de 35 °C y 40 °C.

2.2.2. Correlación de las proyecciones del IPCC con los datos de la UICN

Las amenazas directas a las especies en los sitios de SbN se correlacionaron con los cambios proyectados en las presiones bioclimáticas utilizando el coeficiente de correlación de Spearman [57]. El coeficiente de correlación de Spearman ρ es una medida de la fuerza y dirección de la asociación monótona entre dos variables independientes. La interpretación de la correlación de Spearman depende de varios factores: cuanto más cerca esté ρ de +1 o -1, más fuerte será la relación monótona. Se realizó una correlación de Spearman para determinar la relación de las variables seleccionadas del SSP1-2.6 y SSP5-8.5 del IPCC para la temperatura, la sequía y la precipitación con el número de especies amenazadas por la respectiva amenaza a la biodiversidad de la UICN. La correlación de las proyecciones del IPCC con los datos de la UICN permite comprender los efectos de los cambios previstos en las presiones bioclimáticas sobre la biodiversidad local en los sitios de SbN. Una correlación positiva (la presión bioclimática ha amenazado a muchas especies y se prevé que aumente hasta 2100) indica que la presión climática supone una amenaza de pérdida de biodiversidad en el sitio de SbN.

2.3. Impacto Probabilístico del Clima en la Biodiversidad

El efecto del estrés térmico en un ecosistema en su conjunto puede simularse integrando el estrés térmico proyectado entre especies con interacciones en la red alimentaria. Se construyeron redes alimentarias simplificadas para sitios de SbN de Australia Oriental, América del Norte y Europa para simular los efectos previstos del aumento de la temperatura en varios niveles tróficos [58,59]. Esto se realiza utilizando únicamente los grupos de especies considerados y detallados anteriormente. Las interacciones se basaron en el escenario climático SSP5 y en las estimaciones porcentuales de especies dentro de un grupo de especies determinado que están amenazadas por el estrés térmico, como se muestra en las curvas DSE-LSTT.

El grado en que los planes de gestión de la conservación de la naturaleza (GCN) de SbN tienen en cuenta los escenarios de cambio climático y abordan su impacto en la biodiversidad es clave para determinar cómo contribuyen dichos planes a la conservación activa o potencial de las especies amenazadas. Los planes de GCN no solo tienen que designarse para especies que actualmente están amenazadas, sino que también deben incluir especies potencialmente amenazadas como resultado de las condiciones bioclimáticas cambiantes. Con este fin, se elaboraron previsiones que dieron como resultado proyecciones probabilísticas utilizando FPA y un análisis de perfiles de amenazas a la biodiversidad para conductores bioclimáticos externos para grupos de especies seleccionados; esto se repitió para cada región considerada. La representación gráfica de los límites de tolerancia térmica resultantes de las especies en relación con la relación de respuesta LSTT-DSE proporcionó información sobre posibles puntos de inflexión y degradación de la biodiversidad como resultado de conductores bioclimáticos externos debido a los efectos del calentamiento global en los ecosistemas. En línea con [30], los planes de GCN de los 12 sitios considerados se compararon utilizando la relación de respuesta LSTT-DSE para determinar el grado en que el cambio climático se considera y afecta a estos sitios. Esto se realiza para mejorar el modelo IBB y evaluar la vulnerabilidad de la biodiversidad en los sitios SbN para diferentes zonas climáticas en relación con los escenarios de cambio climático. Además, también correlacionamos los cambios previstos y cómo pueden estar afectando a la biodiversidad local. La correlación estadística de Spearman es más limitada, ya que no describe los posibles puntos de inflexión, pero puede resaltar las presiones bioclimáticas locales que son motivo de preocupación para la planificación de la conservación de la naturaleza.

Resultados

3.1. Creación de Conjuntos de Datos

Se han seleccionado doce sitios de SbN en el noroeste de Europa (seis), el este de Norteamérica (cuatro) y el este de Oceanía (dos), incluidos seis sitios costeros y seis sitios fluviales. Los sitios de SbN se encuentran en cuatro zonas climáticas diferentes según la clasificación climática de Köppen-Geiger para el presente (1980-2016) y el futuro (2081-2100) (Tabla 1). Algunos de los sitios de SbN de Norteamérica y Oceanía considerados se encuentran en varias zonas climáticas, debido a la ubicación de los sitios y al bajo nivel de confianza en prescribir una sola zona climática. Al observar las clasificaciones actuales y las de 2081-2100, el cambio climático proyectado da como resultado que las zonas se alteren para la mayoría de los sitios de SbN.

El modelo CMIP6 del IPCC proyecta grandes variabilidades bioclimáticas entre los sitios de SbN y los continentes (Tabla A3 y Tabla A4). En los sitios europeos de SbN, los cambios proyectados más significativos son períodos más largos de sequía (DSC, SSP1: 0,28-2,08 días; SSP5: 1,44-8,49 días) y precipitaciones más extremas (máx. 5d, SSP1: 3,40-7,47%; SSP5: 14,16-19,78%). En los lugares de SbN de América del Norte, la temperatura aumenta (media anual, SSP1: 2,29-2,78 °C; SSP5: 5,74-6,99 °C) y las precipitaciones se intensifican (máx. 5d, SSP1: 5,23-7,63%; SSP5: 17,42-21,51%) de forma más significativa. El nivel del mar puede subir más en la costa de Long Beach Island (América del Norte), con cambios de 0,69 m (SSP1) a 0,97 m (SSP5), mientras que en los otros sitios costeros de SbN, se documentaron subidas del nivel del mar de 0,4 m (SSP1) a 0,7 m (SSP5). En cifras absolutas, se prevé que los sitios de América del Norte experimenten niveles más altos de precipitación y menos días secos consecutivos que Europa (en el SSP5; $F(2, 9) < 5,2$, $p < 0,05$). Por el contrario, Europa experimentará períodos secos más largos y un aumento más fuerte de los días secos consecutivos en comparación con los sitios norteamericanos bajo SSP5 ($p = 0,07$) y los sitios oceánicos bajo SSP1 ($p = 0,04$) y SSP5 ($p = 0,06$). Las precipitaciones aumentan de manera similar en Europa en comparación con los sitios de América del Norte y Oceanía bajo SSP1 ($F(2, 9) = 4,619$, $p = 0,36$) y SSP5 (NA: $p = 0,05$, OC: $p = 0,54$). Las temperaturas extremas, es decir, días con temperaturas superiores a 35 °C y 40 °C, serán más probables en los sitios estadounidenses y australianos, con eventos poco frecuentes en Europa. Bajo el SSP5 especialmente, los días extremadamente calurosos serán más frecuentes.

Los mapas de sensibilidad de la biodiversidad (Figura 2) muestran el número de especies amenazadas en las zonas de América del Norte, Oceanía y Europa, así como por temperaturas extremas, tormentas e inundaciones, sequías y cambios y alteraciones del hábitat. Los mapas de sensibilidad de la biodiversidad muestran que los sitios de SbN de América del Norte están amenazados por la combinación de sequía, temperatura, precipitación y cambios y alteraciones del hábitat, y que la mayoría de los mamíferos y aves están bajo presión. Los sitios europeos de SbN están amenazados por la combinación de temperatura, sequías y desplazamiento y alteración del hábitat, y la mayoría de las especies bajo presión son aves, mamíferos y moluscos. Los sitios oceánicos de SbN están amenazados por la combinación de temperatura, precipitación, sequía y desplazamiento y alteración del hábitat, y la mayoría de las especies bajo presión son aves y mamíferos. Es importante señalar que, en la mayoría de los casos en que las especies están amenazadas, es como resultado del desplazamiento y la alteración del hábitat. Esto es especialmente cierto en el caso de las aves y los mamíferos. En el caso de las aves, esto es más notable en el arroyo Springhouse Runs y en el humedal Tomago, donde un gran número de especies de aves están amenazadas debido al cambio y la alteración del hábitat.

3.2. Impacto Bioclimático en la Biodiversidad

Las previsiones que generan resultados probabilísticos se realizan mediante la aplicación de la Fracción Potencialmente Afectada. Posteriormente, se genera un análisis de los perfiles de amenaza a la biodiversidad y proyecciones climáticas para grupos de especies seleccionados por región. La Figura 3, la Figura 4, la Figura 5, la Figura A2, la Figura A3 y la Figura A4 muestran las curvas DSE generadas para la relación de respuesta LSTT-DSE para diferentes grupos de especies por continente. Para proporcionar información sobre los aspectos de degradación de las especies relacionados con la temperatura extrema proyectada, las figuras muestran las líneas de 35 °C y 40 °C, indicando que las especies del lado izquierdo experimentan estrés por calor a esas temperaturas (no indicado para especies acuáticas). Las curvas LSTT-DSE muestran que muchos grupos de especies son sensibles al estrés por calor, lo que indica una disminución potencialmente dramática de las especies en los sitios SbN debido a las frecuentes olas de calor en América del Norte y Oceanía.

En Norteamérica, muchas especies tienen un nivel de tolerancia térmica por debajo de los 35 °C (Figura 3 y Figura A2), mientras que se prevé que las temperaturas en los lugares con SbN superen los 35 °C durante 5 a 24 días en 2100 según el SSP1 y de 33 a 84 días según el SSP5 (Tabla A4). Aproximadamente el 60% de los mamíferos y el 50% de las aves tienen una ZTNS inferior a 35 °C y aproximadamente el 45% de los anfibios tienen una CTmax máxima inferior a 35 °C. La mayoría de las especies tienen un nivel de tolerancia térmica inferior a 40 °C, pero los días de más de 40 °C son mucho menos frecuentes.

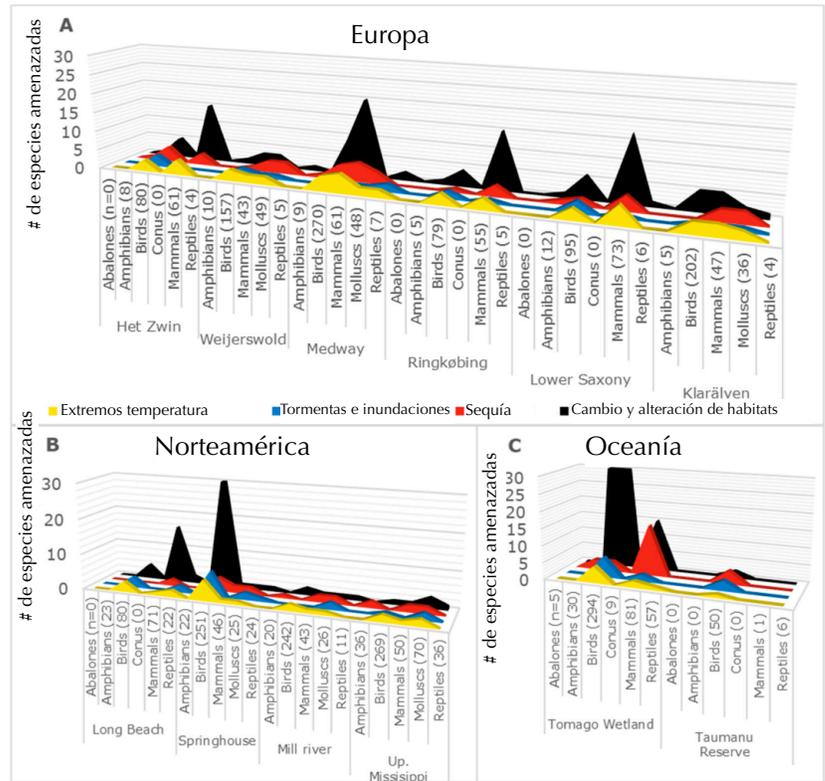


Figura 2. Número de especies amenazadas de abalones, anfibios, aves, conus, mamíferos, moluscos y reptiles en sitios SbN en Europa (A), América del Norte (B) y Oceanía (C) debido a temperaturas extremas, tormentas e inundaciones, sequías y cambios y alteraciones del hábitat. Entre paréntesis se indica el número total de especies endémicas presentes en la base de datos de la UICN.

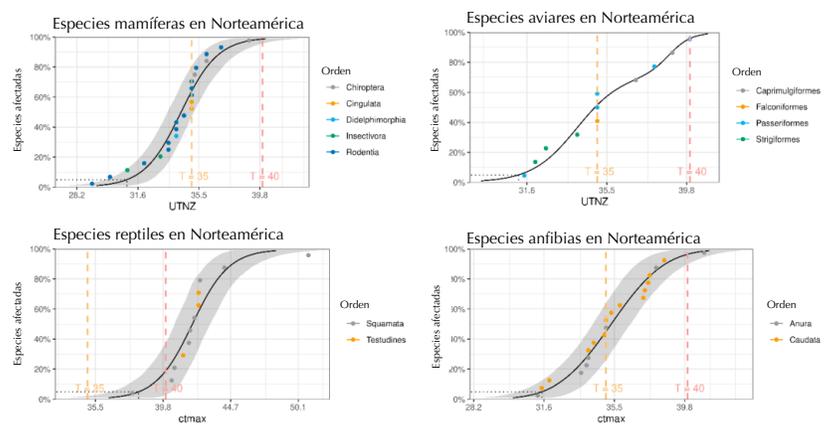


Figura 3. Las distribuciones de sensibilidad de las especies para América del Norte. La relación ZTNS y la CTmax DSE-respuesta de especies de invertebrados y vertebrados se muestra como curvas sigmoides [40]. El porcentaje de especies afectadas a temperatura (°C) está representado por la línea negra continua, con el intervalo de confianza del 95% promediado por el modelo indicado por la banda sombreada, y el umbral del 5% de especies afectadas por la línea de puntos negra. En 2100, en Norteamérica, se prevé que las temperaturas ambiente superen los 35 °C durante 5-25 días (SSP1) y 33-85 días (SSP5) y superen los 40 °C durante 0-2 días (SSP1) y 5-22 días (SSP5). Obsérvese que un gran grupo de especies muestra una alta sensibilidad a las temperaturas extremas previstas para 2100.

En los sitios europeos, no se prevé que los días de calor extremo sean frecuentes. Solo en el escenario SSP5 se espera que entre 0 y 9 días superen los 35 °C (tabla A3). Aproximadamente el 70% de las aves y los mamíferos (en conjunto) tienen una ZTNS inferior a 35 °C (figura 4 y figura A3).

En los sitios de Oceanía, solo se prevé que se produzcan días extremadamente cálidos en el humedal de Tomago (Tabla A4), mientras que muchas especies tienen un nivel de tolerancia térmica inferior a 35 °C (Figura 5 y Tabla A4). Las temperaturas superan los 35 °C entre 14 (SSP1) y 41 días (SSP5) y las temperaturas superan los 40 °C entre 1 (SSP1) y 7 días (SSP5). Aproximadamente el 90% de los mamíferos y el 55% de las aves tienen una ZTNS inferior a 35 °C y aproximadamente el 60% de los anfibios tienen una CTmax inferior a 35 °C. En total, el 100% de estas especies tienen una tolerancia a la temperatura inferior a 40 °C.

El resultado de correlacionar las amenazas actuales a la biodiversidad con las proyecciones de las presiones bioclimáticas cambiantes, como la temperatura media anual, la precipitación máxima en 5 días y las sequías (SCC), no muestra correlaciones positivas claras entre todos los sitios considerados a escala global (Tabla A5). Sin embargo, a escala regional, se encontraron correlaciones positivas moderadas ($\rho > 0,4$), fuertes ($\rho > 0,6$) y muy fuertes ($\rho > 0,8$) para la precipitación y la sequía entre los sitios europeos de SbN y las futuras zonas climáticas Cfa (América del Norte y Oceanía) y Cfb (Europa). Las correlaciones positivas ponen de relieve un desequilibrio en las presiones climáticas que son motivo de preocupación, donde la biodiversidad en algunos sitios, por continente o zona climática, puede ser particularmente vulnerable y excepcionalmente influenciada bajo las condiciones climáticas proyectadas de intensificación consideradas. Por ejemplo, en Europa, se prevé que la sequía se intensifique, especialmente en los sitios SbN donde la biodiversidad muestra sensibilidad a las sequías ($\rho(6) = 0,78$, $p = 0,06$), como es el caso de la cuenca del Medway y Het Zwin.

3.3. El efecto de la intensificación de las condiciones climáticas en los ecosistemas en su conjunto

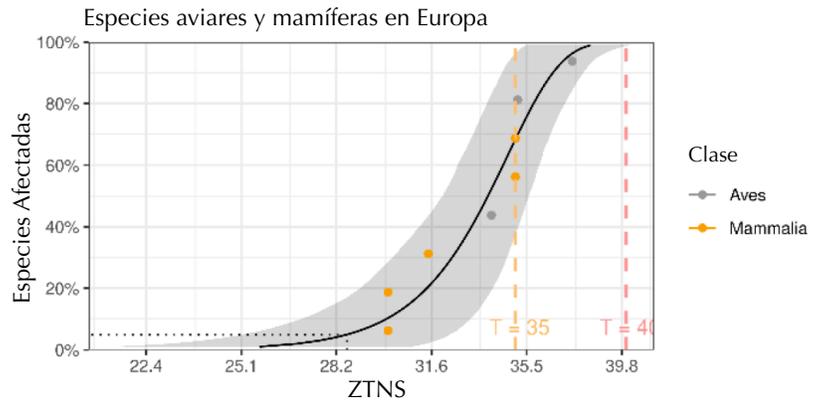


Figura 4. Las distribuciones de sensibilidad de las especies para Europa. La relación respuesta LSTT-DSE de las especies de vertebrados se muestra como curvas sigmoideas [40]. El porcentaje de especies afectadas a una temperatura (°C) está representado por la línea negra continua, con el intervalo de confianza del 95% promediado por el modelo indicado por la banda sombreada, y el umbral del 5% de especies afectadas por la línea de puntos negra. En 2100, en Europa, se prevé que las temperaturas ambiente superen los 35 °C durante 0-1 días (SSP1) y 0-9 días (SSP5) y superen los 40 °C durante 0 días (SSP1) y 0-2 días (SSP5). Tenga en cuenta que, aunque muchas especies muestran una alta sensibilidad a las temperaturas extremas, las proyecciones muestran que las temperaturas extremas serán muy poco frecuentes en 2100.

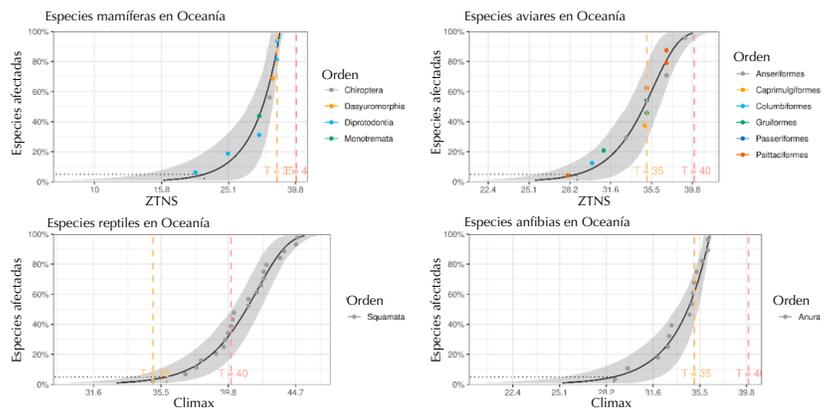


Figura 5. Las distribuciones de sensibilidad de las especies para Oceanía. La relación ZTNS y la CTmax DSE-respuesta de especies de invertebrados y vertebrados se muestra como curvas sigmoideas [40]. El porcentaje de especies afectadas a temperatura (°C) está representado por la línea negra continua, con el intervalo de confianza del 95% promediado por el modelo indicado por la banda sombreada, y el umbral del 5% de especies afectadas por la línea de puntos negra. En 2100, en los sitios de Oceanía, se prevé que las temperaturas ambiente superen los 35 °C durante 0 y 14 días (SSP1) y 0 y 41 días (SSP5), y superen los 40 °C durante 0 y 1 días (SSP1) y 0 y 7 días (SSP5). Téngase en cuenta que un gran grupo de especies muestra una alta sensibilidad a las temperaturas extremas, que se prevé que se produzcan con frecuencia solo en el este de Australia en 2100.

Norteamérica: Interacciones de la red trófica según LSTT-SDD y el escenario 8.5 del IPCC

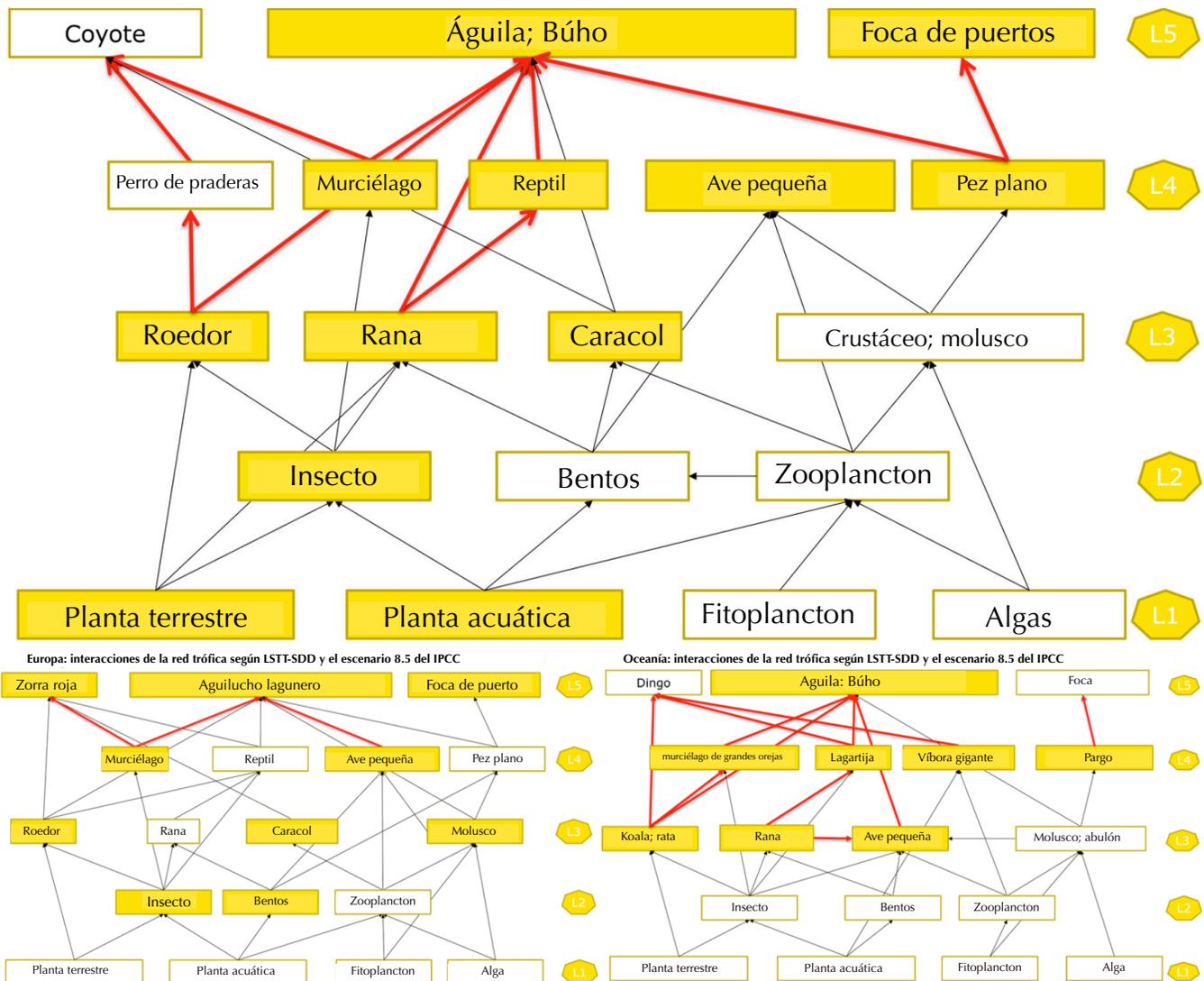


Figura 6. Visualización de las interacciones de la red alimentaria en riesgo entre los principales grupos de especies en América del Norte (arriba), Europa (abajo a la izquierda) y Oceanía (abajo a la derecha). Las flechas muestran las interacciones depredador-presa, y las flechas rojas indican que la presa está bajo presión debido a las temperaturas extremas. Los umbrales resultan de las proyecciones del IPCC sobre temperaturas extremas para 2081-2100 en el escenario SSP5-8.5 y las relaciones de respuesta LSTT-SSD. Los grupos de especies sin datos LSTT-SSD se muestran en blanco.

3.3. El Efecto de la Intensificación de las Condiciones Climáticas en los Ecosistemas en su Conjunto

El efecto del estrés térmico entre las especies se integró con las interacciones de la red alimentaria basadas en las estimaciones porcentuales de especies afectadas por el estrés térmico (Figura 6). Esta evaluación tiene como objetivo indicar qué porcentaje de un determinado grupo de especies está en riesgo y potencialmente eliminado de la dinámica de la red alimentaria, o al menos reducido significativamente. La mayoría de las interacciones de la red alimentaria potencialmente afectadas existen entre los niveles tróficos superiores. Estas presiones de temperatura extrema son indicativas de una disminución dramática de las especies al limitar las interacciones de la red alimentaria y, potencialmente, la biomasa total. Los eventos de extinción rara vez son reversibles sin considerables esfuerzos de conservación; si son causados por presiones climáticas persistentes y cada vez más severas, la reversibilidad o

mitigación es muy poco probable. Esto pone de relieve que, a través de las olas de calor, se produce una reducción en el número de especies y niveles tróficos, lo que tiene un impacto e influencia directa en el número de características clave de las especies.

En los sitios de Oceanía, las temperaturas extremas causan un impacto considerable en la biodiversidad, según las curvas LSTT-DSE y los datos de la UICN. Sin embargo, la sequía y el cambio y la alteración del hábitat también tienen un profundo impacto en las poblaciones de aves, mamíferos y anfibios. Varias especies experimentan un riesgo acumulativo de temperaturas extremas y sequía, a saber, especies del género murciélago *Vespudelus*, rana *Pseudophryne* y paloma *Hemiphaga*, según las evaluaciones de datos de LSTT-DSE y la UICN, y las especies de aves *Larus bulleri*, koala *Phascolarctos cinereus* y murciélago *Pteropus poliocephalus*, según la evaluación de datos de la UICN. En Norteamérica y Europa, los conjuntos de datos de LSTT-DSE y la UICN no mostraron ninguna especie o género coincidente. Según el conjunto de datos de la UICN, en Norteamérica sí existió un impacto acumulativo por calor extremo y sequía para los moluscos *Cyclonaias tuberculata*, *Lampsilis cariosa*, *Ligumia recta* y *Margaritifera margaritifera*, y la mofeta *Mephitis mephitis*. En Europa, el calor y la sequía afectan a los murciélagos *Eptesicus serotinus*, *Myotis nattereri* y *Plecotus auratus*, y al molusco *Margaritifera margaritifera*.

Discusión

Al considerar los efectos de las condiciones climáticas cambiantes en los sitios de SbN, no solo se deben tener en cuenta las múltiples escalas que los impactos del cambio climático tienen en la biodiversidad, sino también las consecuencias que los impactos acumulativos tienen en relación con el aumento de las presiones climáticas sobre los ecosistemas. Estos cambios bioclimáticos también dependen de los mecanismos evolutivos y de comportamiento de las especies, la conectividad disponible con otros hábitats, las interacciones entre especies y los cambios de distribución en el medio ambiente que están afectando a los ecosistemas [9]. Estos cambios en los ecosistemas, junto con la degradación del hábitat inducida por fenómenos como el aumento del nivel del mar, los incendios forestales, las alteraciones de la temperatura de las corrientes y los cambios en la distribución de las especies, plantean importantes desafíos e imponen importantes factores de estrés [7,8,10,12].

El objetivo de esta publicación es evaluar los riesgos que plantean para la biodiversidad los escenarios del IPCC referenciados en respuesta al cambio climático, utilizando indicadores y variables clave de sensibilidad de las especies. Al hacerlo, abordamos cómo las presiones bioclimáticas impulsadas por el cambio climático pueden afectar a la biodiversidad basándonos en los perfiles IPCC-UICN y utilizando la relación de respuesta LSTT-SSD para grupos de especies. La referencia [60] expresa la necesidad de utilizar las proyecciones del cambio climático para tomar medidas sobre las olas de calor, los episodios de precipitaciones extremas y las sequías extremas, una afirmación reafirmada a través de este conjunto de trabajos. Sin embargo, se ha planteado una nueva preocupación: ¿cómo están integrando los planes de gestión de conservación de la naturaleza de SbN el cambio climático y los escenarios de impacto en el contexto de la biodiversidad? Sería necesario utilizar estas relaciones y sus impactos en proyecciones a mediano y largo plazo para apoyar o informar la conservación de especies (potencialmente) amenazadas frente a las presiones climáticas. Este estudio destaca el hecho de que la conservación de estas especies en los sitios de SbN actualmente señalados puede no ser posible.

Se han desarrollado modelos para proporcionar perfiles de respuesta y cuantificar los impactos de las presiones bioclimáticas en la distribución de las especies [61]. Estos perfiles de respuesta se consideran «huellas dactilares» y son indicativos de qué especies se ven afectadas por los subconjuntos cambiantes de variables de presión climática y cuáles

no [35]. La referencia [62] ha sugerido que los planes de conservación deben explorar las relaciones entre la biodiversidad y la dinámica de los ecosistemas en respuesta a los extremos climáticos para comprender las implicaciones de los sistemas que se ven perturbados por eventos extremos periódicos. Para ello, es necesario hacer más hincapié en el desarrollo o en aplicaciones más amplias de modelos predictivos que tengan en cuenta las interacciones entre los procesos atmosféricos, los patrones de comportamiento y migración y los ecosistemas. Estos modelos acoplados permitirían predecir la eficacia de las intervenciones de modelos de nicho sobre marcos alternativos para investigaciones específicas de cada lugar, lo que aumentaría la resiliencia y permitiría hacer predicciones más completas de los impactos del cambio climático en los ecosistemas [25,63,64].

Estudios anteriores han demostrado que la proporción relativa de especies amenazadas, de la Lista Roja de la UICN en combinación con los predictores de la UICN, es un indicador relevante para evaluar los efectos del cambio climático en las variables bioclimáticas y la biodiversidad. Sin embargo, la mayoría de los estudios no se realizaron para sitios de SbN en múltiples transectos basados en zonas climáticas. En nuestro estudio, las proyecciones climáticas globales del IPCC se combinan con las amenazas actuales a la biodiversidad de la UICN para mejorar la comprensión de la eficacia de la aplicación de SbN para la adaptación climática y la conservación de la biodiversidad. El método de migración de especies para apoyar o reemplazar estructuras poblacionales en declive no se analiza dentro del alcance de este estudio; sin embargo, es probable que desempeñe un papel importante en el desplazamiento de poblaciones y en la sustitución de aquellas que ya no son adecuadas para ciertas regiones. Un análisis sobre las especies foráneas que migran debido a los cambios en los hábitats y en las zonas de distribución adecuadas queda fuera del alcance de esta investigación, ya que recopilar esta información requeriría un análisis crítico de la dinámica de la red alimentaria y la suplantación de especies endémicas, lo que podría conducir a cambios estructurales y funcionales en la composición ecológica. Se ha citado que este cambio de biomas da lugar a oleadas de lo que ahora se considerarían especies invasoras y a alteraciones drásticas de las redes alimentarias, especialmente en los plazos de 2080-2100.

4.1. Planificación de la Gestión de la Conservación de la Naturaleza SbN

El modelo IBB incorpora proyecciones sobre futuras presiones bioclimáticas a través de perfiles de amenaza de especies que muestran las vulnerabilidades de las especies basadas en investigaciones empíricas, así como relaciones de respuesta LSTT-SSD, para resaltar los puntos de inflexión de las especies para temperaturas extremas, destacando las presiones bioclimáticas que deben ser el punto focal de la planificación de la conservación de la naturaleza. En los sitios norteamericanos, se prevé que las condiciones climáticas pasen de un clima continental húmedo a un clima subtropical más húmedo. Se espera que las temperaturas aumenten entre 2 °C y 7 °C, con una mayor frecuencia de olas de calor. La biodiversidad en cuatro sitios de SbN está especialmente amenazada por las olas de calor, en particular para las especies de niveles tróficos superiores, y el estrés térmico afectará significativamente a aproximadamente el 60 % de los mamíferos, el 50 % de las aves y el 45 % de los anfibios durante períodos que oscilarán entre 5 y 84 días al año a partir de 2080. Además, la intensificación de las sequías y los episodios de precipitaciones, los cambios y alteraciones de los hábitats y sus efectos acumulativos suponen una amenaza importante para los mamíferos y las aves, entre otras especies. El examen de los planes de gestión de conservación de la naturaleza de los sitios SbN de América del Norte revela una deficiencia significativa en la planificación para aumentar la resiliencia al aumento de las temperaturas, las precipitaciones y la sequía [30], lo que indica la necesidad de mejoras sustanciales.

En los sitios de Oceanía, se prevé que las condiciones climáticas cambien de un clima oceánico templado a un clima más subtropical. Se esperan olas de calor frecuentes, así como episodios de precipitaciones intensificadas, particularmente en el sitio de SbN en Nueva Zelanda. La biodiversidad en dos estudios de caso de SbN, de nuevo principalmente los de niveles tróficos más altos, se enfrenta a amenazas considerables por las olas de calor, con estrés

térmico que afecta significativamente a aproximadamente el 90% de los mamíferos, el 55% de las aves y el 60% de los anfibios durante periodos de entre 14 y 41 días al año, a partir de 2080. Además, la intensificación de las sequías, los episodios de precipitaciones y los cambios y alteraciones del hábitat, junto con los efectos acumulativos, amenazan a las aves y los mamíferos, entre otras especies. Aunque los planes de gestión de la conservación de la naturaleza para los sitios SbN de Oceanía en esta región abordan estas preocupaciones y tienen como objetivo mejorar la resiliencia a las crecientes presiones bioclimáticas, el porcentaje potencialmente alto de especies que experimentarán estrés por calor sigue siendo alarmante.

En los sitios europeos, se prevé que las condiciones climáticas se mantengan relativamente estables, y solo el sitio de Klarälven Värmland experimentará un cambio de un clima continental húmedo a un clima oceánico más templado. Sin embargo, se espera que las sequías y las precipitaciones se intensifiquen. Aunque las aves y los mamíferos de esta región son sensibles a las olas de calor, estos fenómenos seguirán siendo poco frecuentes en los sitios europeos. No obstante, la biodiversidad es sensible a los aumentos de temperatura, y la intensificación de las sequías, los episodios de precipitación y los cambios y alteraciones del hábitat suponen una amenaza para las aves, los mamíferos y los moluscos. El examen de los planes de gestión de la conservación de la naturaleza para los sitios europeos de SbN indica que existen estrategias para abordar las preocupaciones relacionadas con el aumento de las temperaturas, las precipitaciones y los cambios de hábitat. Sin embargo, existe una notable falta de planificación para mejorar la resiliencia ante la intensificación de las sequías, lo que requiere mejoras significativas en estas áreas.

4.2. Efectos del Aumento de la Temperatura en la Biodiversidad

Existe una posibilidad realista de que, incluso en el escenario de acción más ambicioso SSP1-1.9, el calentamiento global supere los 1,5 °C en la próxima década; incluso los 2 °C están al alcance, según los escenarios de emisiones SSP3-7.0 y SSP5-8.5 [65,66]. Sin embargo, el IPCC prevé un calentamiento extremo adicional en el futuro. Los sitios SbN se aplican ampliamente como estrategia de adaptación climática; sin embargo, no siempre se aplican de manera efectiva, y a menudo solo se tienen en cuenta las inundaciones. Algunos estudios han utilizado conjuntos de datos globales, con una resolución temporal que incluye períodos históricos y se extiende a horizontes temporales futuros mediante la inclusión de un posprocesamiento de simulaciones climáticas [67]. Hemos demostrado que la biodiversidad está amenazada debido a temperaturas extremas más frecuentes, basándonos en la relación de respuesta LSTT-SSD, las proyecciones de temperatura en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5, y los datos empíricos sobre amenazas a las especies.

Muchos grupos de especies que están amenazados por las condiciones de temperaturas extremas proyectadas residen en niveles tróficos más altos (Figura 6), lo que podría desestabilizar el equilibrio de las redes alimentarias y, en consecuencia, reducir la autorregulación de los ecosistemas y aumentar el riesgo de pérdida de biodiversidad. Sería útil realizar investigaciones más intensivas sobre los efectos del cambio climático y las consiguientes redistribuciones probabilísticas de los ecosistemas y hábitats en la Tierra para estudiar las implicaciones a múltiples escalas de las respuestas al impacto climático. Sobre la base de tales estudios, como demostramos en nuestros ejemplos, la relación de respuesta LSTT-SSD interna puede relacionarse con los SSD basados en el hábitat para la evaluación del riesgo ecológico de los puntos de inflexión inducidos por el calentamiento global.

La referencia [68] sugiere que las perturbaciones en los ensamblajes ecológicos causadas por el cambio climático serán abruptas y el resultado de la ruptura de la resiliencia. Dentro de cualquier ensamblaje ecológico dado, la exposición de la mayoría de las especies a condiciones climáticas más allá de sus límites de nicho se produce casi simultáneamente. Según nuestro estudio de los conjuntos de biodiversidad, las amenazas a la biodiversidad y las proyecciones

bioclimáticas sugieren graves rupturas de la biodiversidad en varios ecosistemas de Norteamérica y el este de Australia, lo que se corrobora aún más con las relaciones de respuesta LSTT-SSD. El impacto puede estar infravalorado debido a los efectos acumulativos de las temperaturas extremas y las sequías en la biodiversidad, en combinación con las alteraciones del hábitat.

4.3. Impactos Acumulativos en la Biodiversidad

Las sorprendentes conclusiones basadas en la relación de respuesta LSTT-SSD pueden verse como una metáfora de la sensibilidad de las especies, vinculada a otros fenómenos meteorológicos extremos. Nuestro estudio pone de relieve la necesidad de investigar los puntos de inflexión de las especies ante las presiones climáticas de las sequías, las precipitaciones extremas y la subida del nivel del mar. Las condiciones climáticas cambiantes son causadas por una cadena de efectos y presiones bioclimáticas agravantes [14], como los cambios en la temperatura y el ciclo del agua. Sin embargo, no hay evidencia empírica de que la biodiversidad muestre una respuesta de inflexión a todos los conductores ambientales; tratar de formular o sugerir una «manejabilidad» que, de hecho, no es factible, todavía se aconseja en muchos casos y es adverso a los objetivos de conservación [69]. El modelo IBB aplicado muestra los cambios temporales en la composición y los cambios espaciales en la relación de respuesta LSTT-SSD de las zonas climáticas. Utilizando la relación de respuesta LSTT-SSD en las zonas climáticas de Köppen-Geiger, se puede aclarar el número de interacciones de especies afectadas en un ecosistema ecológico. Aun así, debido a la presión bioclimática y antropogénica acumulada sobre la biodiversidad, la respuesta de inflexión de las especies será difícil de determinar.

Las especies sensibles suelen verse afectadas negativamente, debido a las presiones bioclimáticas acumulativas, como se observa en los sitios de América del Norte y Australia Oriental, donde las zonas climáticas pasan de condiciones climáticas continentales húmedas a un clima subtropical más húmedo. El impacto lo sienten más notablemente las poblaciones de anfibios, aves, mamíferos y peces, que corren un alto riesgo de sufrir los efectos derivados de los cambios en el hábitat. Esto es especialmente pronunciado en el humedal de Tomago, ya que muestra altos porcentajes de especies amenazadas. Dado que las especies sensibles están expuestas a riesgos causados por temperaturas extremadamente altas y, además, por efectos acumulativos, se espera que estos cambios tengan un impacto razonable en múltiples poblaciones.

Se reafirma que los ecosistemas tropicales son los más vulnerables al cambio climático. En estas zonas climáticas, los cambios de temperatura se han identificado como un punto de inflexión clave y un desencadenante de la disminución de anfibios, aves y mamíferos, mientras que los umbrales pueden superarse por los efectos acumulativos de los días calurosos por encima de los 35 °C durante períodos prolongados de sequía. Los mecanismos de adaptación a la sequía existen en la combinación de procesos ecológicos, estrategias fisiológicas y cambios morfológicos del hábitat [22,70]. Sin embargo, cuando las sequías, las temperaturas extremas y las olas de calor se producen al mismo tiempo, los elementos de la biodiversidad muestran diferencias considerables en cuanto a la tolerancia a la sequía y la mortalidad de las especies en toda la red alimentaria [71,72,73,74].

Conclusiones

Este documento ilustra los beneficios de integrar las trayectorias del cambio climático del IPCC con las amenazas a la biodiversidad de la UICN y los niveles superiores de tolerancia térmica para una variedad de grupos de especies. Demuestra que hacerlo mejora el grado en que se considera la resiliencia climática en la planificación de la conservación de la naturaleza para los sitios de SbN y puede resaltar problemas con las estrategias de implementación a mediano y largo plazo. Al aplicar el modelo de impacto bioclimático-biodiversidad, se puede explorar la relación causal

entre el nivel de exposición a temperaturas ambientales extremas y el nivel de efecto sobre especies individuales. Al hacerlo, se puede desarrollar una explicación convincente de cómo el cambio climático afecta a las especies. Las proyecciones bioclimáticas sugieren graves rupturas de la biodiversidad en varios ecosistemas de sitios SbN de Australia oriental y América del Norte en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 en 2081-2100. Esto se corrobora aún más con el análisis realizado utilizando las relaciones de respuesta LSTT-SSD y las predicciones climáticas futuras para estas regiones. La respuesta LSTT-SSD a temperaturas ambientales extremas se ha identificado como un punto de inflexión clave para muchas especies de anfibios, aves y mamíferos en sus respectivas redes tróficas. Las respuestas LSTT-SSD pueden utilizarse para poner de relieve el riesgo potencial entre los niveles tróficos en las estructuras de las redes tróficas. Nuestros resultados indicaron la posible desestabilización de las redes tróficas, en particular de los vínculos dentro de los niveles tróficos superiores. Para alinear mejor las ambiciones y los objetivos de conservación de los sitios SbN, los planes de GCN tienen que considerar mejor las múltiples presiones que se acercan como resultado del cambio climático y las crisis pendientes relacionadas con este. Los planes de GCN que buscan proteger especies amenazadas no pueden hacerlo de manera efectiva sin la incorporación de factores de estrés acoplados representados en diversas trayectorias de políticas, y centrarse en esas trayectorias sigue siendo realista, a pesar de los niveles actuales de acción o inacción. Se necesitan más investigaciones sobre los efectos y los puntos de inflexión de las presiones climáticas (por ejemplo, la sequía) sobre la biodiversidad y las consiguientes redistribuciones probabilísticas de los ecosistemas y hábitats de la Tierra.

Apéndice A: [Table 1A](#), [Figure A1](#), [Table A2](#), [Table A3](#), [Table A4](#), [Figure A2](#), [Figure A3](#), [Figure A4](#), [Table A5](#) ([disponible sólo en inglés](#)).

Referencias:

1. Pearce-Higgins, J.; Antão, L.; Bates, R.; Bowgen, K.; Bradshaw, C.; Duffield, S.; Ffoulkes, C.; Franco, A.; Geschke, J.; Gregory, R.; et al. A framework for climate change adaptation indicators for the natural environment. *Ecol. Indic.* 2022, 136, 108690.
2. Pershing, A.J.; Alexander, M.A.; Hernandez, C.M.; Kerr, L.A.; Le Bris, A.; Mills, K.E.; Nye, J.A.; Record, N.R.; Scannell, H.A.; Scott, J.D.; et al. Response to Comments on “Slow adaptation in the face of rapid warming leads to collapse of the Gulf of Maine cod fishery”. *Science* 2016, 352, 423.
3. Jay, A.; Reidmiller, D.R.; Avery, C.W.; Barrie, D.; DeAngelo, B.J.; Dave, A.; Dzaugis, M.; Kolian, M.; Lewis, K.L.M.; Reeves, K.; et al. Overview. In *Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment, Volume II*; Reidmiller, D.R., Avery, C.W., Easterling, D.R., Kunkel, K.E., Lewis, K.L.M., Maycock, T.K., Stewart, B.C., Eds.; U.S. Global Change Research Program: Washington, DC, USA, 2018; pp. 33–71.
4. Vinagre, C.; Dias, M.; Cereja, R.; Abreu-Afonso, F.; Flores, A.A.; Mendonça, V. Upper thermal limits and warming safety margins of coastal marine species—Indicator baseline for future reference. *Ecol. Indic.* 2019, 102, 644–649.
5. Fausnacht, D.W.; Kroscher, K.A.; McMillan, R.P.; Martello, L.S.; Baumgard, L.H.; Selsby, J.T.; Hulver, M.W.; Rhoads, R.P. Heat Stress Reduces Metabolic Rate While Increasing Respiratory Exchange Ratio in Growing Pigs. *Animals* 2021, 11, 215.
6. Hallegatte, S.; Rogelj, J.; Allen, M.; Clarke, L.; Edenhofer, O.; Field, C.B.; Friedlingstein, P.; van Kesteren, L.; Knutti, R.; Mach, K.J.; et al. Mapping the climate change challenge. *Nat. Clim. Change* 2016, 6, 663–668.
7. Klausmeyer, K.R.; Shaw, M.R. Climate Change, Habitat Loss, Protected Areas and the Climate Adaptation Potential of Species in Mediterranean Ecosystems Worldwide. *PLoS ONE* 2009, 4, e6392.
8. Mitsch, W.J.; Hernandez, M.E. Landscape and climate change threats to wetlands of North and Central America. *Aquat. Sci.* 2013, 75, 133–149.
9. Weiskopf, S.R.; Rubenstein, M.A.; Crozier, L.G.; Gaichas, S.; Griffis, R.; Halofsky, J.E.; Hyde, K.J.; Morelli, T.L.; Morissette, J.T.; Muñoz, R.C.; et al. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Sci. Total. Environ.* 2020, 733, 137782.
10. van Zelst, V.T.; Dijkstra, J.T.; van Wesenbeeck, B.K.; Eilander, D.; Morris, E.P.; Winsemius, H.C.; Ward, P.J.; de Vries, M.B. Cutting the costs of coastal protection by integrating vegetation in flood defences. *Nat Commun.* 2021, 12, 6533. [Google Scholar] [CrossRef]
11. Muluneh, M.G. Impact of climate change on biodiversity and food security: A global perspective—A review article. *Agric. Food Secur.* 2021, 10, 36.

12. Canadell, J.G.; Meyer, C.P.; Cook, G.D.; Dowdy, A.; Briggs, P.R.; Knauer, J.; Pepler, A.; Haverd, V. Multi-decadal increase of forest burned area in Australia is linked to climate change. *Nat. Commun.* 2021, 12, 6921.
13. Trégarot, E.; D'Olive, J.P.; Botelho, A.Z.; Cabrito, A.; Cardoso, G.O.; Casal, G.; Cornet, C.C.; Cragg, S.M.; Degia, A.K.; Fredriksen, S.; et al. Effects of climate change on marine coastal ecosystems—A review to guide research and management. *Biol. Conserv.* 2024, 289, 110394.
14. Rezaei, S.; Mohammadi, A.; Shadloo, S.; Ranaie, M.; Wan, H.Y. Climate change induces habitat shifts and overlaps among carnivores in an arid and semi-arid ecosystem. *Ecol. Inform.* 2023, 77, 102247.
15. Todgham, A.E.; Stillman, J.H. Physiological Responses to Shifts in Multiple Environmental Stressors: Relevance in a Changing World. *Integr. Comp. Biol.* 2013, 53, 539–544.
16. Rozen-Rechels, D.; Dupoué, A.; Lourdais, O.; Chamaillé-Jammes, S.; Meylan, S.; Clobert, J.; Le Galliard, J. When water interacts with temperature: Ecological and evolutionary implications of thermo-hydroregulation in terrestrial ectotherms. *Ecol. Evol.* 2019, 9, 10029–10043.
17. Tripathy, K.P.; Mukherjee, S.; Mishra, A.K.; Mann, M.E.; Williams, A.P. Climate change will accelerate the high-end risk of compound drought and heatwave events. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2023, 120, e2219825.
18. Bennett, J.M.; Sunday, J.; Calosi, P.; Villalobos, F.; Martínez, B.; Molina-Venegas, R.; Araújo, M.B.; Algar, A.C.; Clusella-Trullas, S.; Hawkins, B.A.; et al. The evolution of critical thermal limits of life on Earth. *Nat. Commun.* 2021, 12, 1198.
19. Moore, J.C. Predicting tipping points in complex environmental systems. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2018, 115, 635–636.
20. Sguotti, C.; Blöcker, A.M.; Färber, L.; Blanz, B.; Cormier, R.; Diekmann, R.; Letschert, J.; Rambo, H.; Stollberg, N.; Stelzenmüller, V.; et al. Irreversibility of regime shifts in the North Sea. *Front. Mar. Sci.* 2022, 9, 945204.
21. Gunderson, A.R.; Stillman, J.H. Plasticity in thermal tolerance has limited potential to buffer ectotherms from global warming. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 2015, 282, 20150401.
22. Vicente-Serrano, S.M.; Quiring, S.M.; Peña-Gallardo, M.; Yuan, S.; Domínguez-Castro, F. A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? *Earth-Sci. Rev.* 2019, 201, 102953.
23. Dezetter, M.; Le Galliard, J.-F.; Leroux-Coyau, M.; Brischoux, F.; Angelier, F.; Lourdais, O. Two stressors are worse than one: Combined heatwave and drought affect hydration state and glucocorticoid levels in a temperate ectotherm. *J. Exp. Biol.* 2022, 225, 243777.
24. Clavero, M.; Villero, D.; Brotons, L. Climate Change or Land Use Dynamics: Do We Know What Climate Change Indicators Indicate? *PLoS ONE* 2011, 6, e18581.
25. Chausson, B.; Turner, D.; Seddon, N.; Chabaneix, C.A.J.; Girardin, V.; Kapos, I.; Key, D.; Roe, A.; Smith, S.; Woroniecki, N.; et al. Mapping the effectiveness of Nature-based Solutions for climate change adaptation. *Glob Change Biol.* 2020, 26, 6134–6155.
26. Aplet, G.H.; Mckinley, P.S. A portfolio approach to managing ecological risks of global change. *Ecosyst. Health Sustain.* 2017, 3, e01261.
27. Aurelle, D.; Thomas, S.; Albert, C.; Bally, M.; Bondeau, A.; Boudouresque, C.; Cahill, A.E.; Carlotti, F.; Chenuil, A.; Cramer, W.; et al. Biodiversity, climate change, and adaptation in the Mediterranean. *Ecosphere* 2022, 13, e3915.
28. Hoveka, L.N.; van der Bank, M.; Davies, T.J. Winners and losers in a changing climate: How will protected areas conserve red list species under climate change? *Divers. Distrib.* 2022, 28, 782–792.
29. Jan, S.A.; Shinwari, Z.K.; Habib, N.; Ali, S.; Afridi, M.S.; Khan, M. Impact of Climate Change on Marine Biodiversity: Current Challenges and Future Perspectives. *Proc. Pak. Acad. Sci. B Pak. Acad. Sci. Life Environ. Sci.* 2023, 60, 29–47.
30. Hielkema, T.W.; Cor, A. Schipper, Berry Gersonius. Global nature conservation and the apparent ineffective adaptation to climate pressures. *Aquat. Ecosyst. Health Manag.* 2023, 26, 33–46.
31. Schipper, C.A.; Dekker, G.; Visser, B.D.; Bolman, B.; Lodder, Q. Characterization of SDGs towards climate resilient coastal infrastructure: Sustainability performance and cross-linking cumulative consequences. *Sustainability* 2020, 13, 1560.
32. Seneviratne, S.I.; Corti, T.; Davin, E.L.; Hirschi, M.; Jaeger, E.B.; Lehner, I.; Orlowsky, B.; Teuling, A.J. Investigating soil moisture—Climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Sci. Rev.* 2010, 99, 125–161.
33. Zscheischler, J.; Westra, S.; Van Den Hurk, B.J.J.M.; Seneviratne, S.I.; Ward, P.J.; Pitman, A.; AghaKouchak, A.; Bresch, D.N.; Leonard, M.; Wahl, T.; et al. Future climate risk from compound events. *Nat. Clim. Change* 2018, 8, 469–477.
34. Woolway, R.I.; Tong, Y.; Feng, L.; Zhao, G.; Dinh, D.A.; Shi, H.; Zhang, Y.; Shi, K. Multivariate extremes in lakes. *Nat. Commun.* 2024, 15, 4559.
35. Beck, H.E.; Zimmermann, N.E.; McVicar, T.R.; Vergopolan, N.; Berg, A.; Wood, E.F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci. Data* 2018, 5, 180214.
36. Bridges, T.S.; Bourne, E.M.; King, J.K.; Kuzmitski, H.K.; Moynihan, E.B.; Suedel, B.C. Engineering with Nature: An Atlas; ERDC/EL SR-18-8; U.S. Army Engineer Research and Development Center: Vicksburg, MS, USA, 2018.
37. Bridges, T.S.; Bourne, E.M.; Suedel, B.C.; Moynihan, E.B.; King, J.K. Engineering with Nature: An Atlas, Volume 2; ERDC SR-21-2; U.S. Army Engineer Research and Development Center: Vicksburg, MS, USA, 2021.
38. Sayers, P.; Gersonius, B.; Özerol, G.; Nugraha, E.; Schipper, C.A. A Framework for Cloud to Coast Adaptation: Maturity and Experiences from across the North Sea. *Land* 2022, 11, 950.
39. IPCC. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson Delmotte, V., Zhai, A.P., Pirani, S.L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M.I., Gomis, M., et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2021; pp. 3–32.
40. IUCN, 2019. The International Union for Conservation of Nature (IUCN) Red List of Threatened Species: Spatial Data. Available online: <https://www.iucnredlist.org/resources/spatial-data-download> (accessed on 18 February 2022).

41. Bennett, J.M.; Calosi, P.; Clusella-Trullas, S.; Martínez, B.; Sunday, J.; Algar, A.C.; Araújo, M.B.; Hawkins, B.A.; Keith, S.; Kühn, I.; et al. GlobTherm, a global database on thermal tolerances for aquatic and terrestrial organisms. *Sci. Data* 2018, 5, 180022.
42. Posthuma, L.; Suter, G.W., II; Traas, T.P.; Species Sensitivity Distributions in Ecotoxicology. CRC Press, 2001. Available online: <https://www.routledge.com/Species-Sensitivity-Distributions-in-Ecotoxicology/Posthuma-II-Traas/p/book/9781566705783> (accessed on 18 July 2023).
43. Schipper, C.A.; Rietjens, I.M.C.M.; Burgess, R.M.; Murk, A.J. Application of bioassays in toxicological hazard, risk and impact assessments of dredged sediments. *Mar. Pollut. Bull.* 2010, 60, 2026–2042.
44. Gutiérrez, J.M.; RG Jones, G.T.; Narisma, L.M.; Alves, M.; Amjad, I.V.; Gorodetskaya, M.; Grose, N.A.B.; Klutse, S.; Krakovska, J.; Li, D.; et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Masson-Delmotte, V.P., Zhai, A., Pirani, S.L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M.I., Gomis, M., et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2021; In Press. Interactive Atlas; Available online: <http://interactive-atlas.ipcc.ch/> (accessed on 8 March 2022).
45. Lange, S. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geosci. Model Dev.* 2019, 12, 3055–3070.
46. Bellard, C.; Leclerc, C.; Courchamp, F. Combined impacts of global changes on biodiversity across the USA. *Sci. Rep.* 2015, 5, 11828.
47. Bellard, C.; Leclerc, C.; Leroy, B.; Bakkenes, M.; Veloz, S.; Thuiller, W.; Courchamp, F. Vulnerability of biodiversity hotspots to global change. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2014, 23, 1376–1386.
48. Pottier, P.; Lin, H.Y.; Oh, R.R.; Pollo, P.; Rivera-Villanueva, A.N.; Valdebenito, J.O.; Yang, Y.; Amano, T.; Burke, S.; Drobniak, S.M.; et al. A comprehensive database of amphibian heat tolerance. *Sci. Data* 2022, 9, 600.
49. Khaliq, I.; Hof, C.; Prinzing, R.; Böhning-Gaese, K.; Pfenniger, M. Global variation in thermal tolerances and vulnerability of endotherms to climate change. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 2014, 281, 20141097.
50. Compton, T.J.; Rijkenberg, M.J.; Drent, J.; Piersma, T. Thermal tolerance ranges and climate variability: A comparison between bivalves from differing climates. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2007, 352, 200–211.
51. Aldenberg, T.; Slob, W. Confidence Limits for Hazardous Concentrations Based on Logistically Distributed NOEC Toxicity Data. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 1993, 25, 48–63.
52. Aldenberg, T.; Jaworska, J.S.; Traas, T.P. Normal species sensitivity distributions and probabilistic ecological risk assessment. In *Species Sensitivity, Distributions in Ecotoxicology*; Posthuma, L., Suter, G.W., II, Traas, T.P., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2002.
53. R Core Team. R: A language and Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2021; Available online: <https://www.R-project.org/> (accessed on 10 September 2024).
54. Kemp, L.; Xu, C.; Depledge, J.; Ebi, K.L.; Gibbins, G.; Kohler, T.A.; Rockström, J.; Scheffer, M.; Schellnhuber, H.J.; Steffen, W.; et al. Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2022, 119, e2108146119.
55. Cox, N.; Young, B.E.; Bowles, P.; Fernandez, M.; Marin, J.; Rapacciuolo, G.; Böhm, M.; Brooks, T.M.; Hedges, S.B.; Hilton-Taylor, C.; et al. A global reptile assessment highlights shared conservation needs of tetrapods. *Nature* 2022, 605, 285–290.
56. Valdez, J.W.; Callaghan, C.T.; Junker, J.; Purvis, A.; Hill, S.L.L.; Pereira, H.M. The undetectability of global biodiversity trends using local species richness. *Ecography* 2023, 2023, e06604.
57. Spearman, C. The Proof and Measurement of Association between Two Things. *Am. J. Psychol.* 1904, 15, 72–101. [Google Scholar] [CrossRef]
58. Rayner, T.S.; Pusey, B.J.; Pearson, R.G.; Godfrey, P.C. Food web dynamics in an Australian Wet Tropics river. *Mar. Freshw. Res.* 2010, 61, 909–917.
59. Boonstra, R.; Andreassen, H.P.; Boutin, S.; Hušek, J.; Ims, R.A.; Krebs, C.J.; Skarpe, C.; Wabakken, P. Why Do the Boreal Forest Ecosystems of Northwestern Europe Differ from Those of Western North America? *BioScience* 2016, 66, 722–734.
60. Griggs, D.; Stafford-Smith, M.; Warrilow, D.; Street, R.; Vera, C.; Scobie, M.; Sokona, Y. Use of weather and climate information essential for SDG implementation. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2021, 2, 2–4.
61. Araújo, M.B.; Luoto, M. The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2007, 16, 743–753.
62. Mahecha, M.D.; Bastos, A.; Bohn, F.J.; Eisenhauer, N.; Feilhauer, H.; Hickler, T.; Kalesse-Los, H.; Migliavacca, M.; Otto, F.E.L.; Peng, J.; et al. Biodiversity and Climate Extremes: Known Interactions and Research Gaps. *Earth's Futur.* 2023, 12, e2023EF003963.
63. Kearney, M. Habitat, environment and niche: What are we modelling? *Oikos* 2006, 115, 186–191.
64. Buckley, L.B.; Carrington, E.; Dillon, M.E.; García-Robledo, C.; Roberts, S.B.; Wegrzyn, J.L.; Urban, M.C. Characterizing biological responses to climate variability and extremes to improve biodiversity projections. *PLOS Clim.* 2023, 2, e0000226.
65. UN (2017a). The Sustainable Development Goals Report; United Nations: New York, NY, USA, 2017; Available online: <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2017/TheSustainableDevelopmentGoalsReport2017.pdf> (accessed on 20 January 2021).
66. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Core Writing Team, Lee, H., Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2023; pp. 35–115.
67. Noce, S.; Caporaso, L.; Santini, M. A new global dataset of bioclimatic indicators. *Sci. Data* 2020, 7, 398.
68. Trisos, C.H.; Merow, C.; Pigot, A.L. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change. *Nature* 2020, 580, 496–501.
69. Hillebrand, H.; Kuczynski, L.; Kunze, C.; Rillo, M.C.; Dajka, J.-C. Thresholds and tipping points are tempting but not necessarily suitable concepts to address anthropogenic biodiversity change—An intervention. *Mar. Biodivers.* 2023, 53, 43.

70. Wang, C.; Li, Z.; Chen, Y.; Ouyang, L.; Li, Y.; Sun, F.; Liu, Y.; Zhu, J. Drought-heatwave compound events are stronger in drylands. *Weather. Clim. Extrem.* 2023, 42, 100632.
71. Biber, M.F.; Voskamp, A.; Hof, C. Potential effects of future climate change on global reptile distributions and diversity. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2023, 32, 519–534.
72. Lebreton, J.-D. The impact of global change on terrestrial Vertebrates. *Comptes Rendus Biol.* 2011, 334, 360–369.
73. Okello, M.M.; Kenana, L.; Maliti, H.; Kiringe, J.W.; Kanga, E.; Warinwa, F.; Bakari, S.; Ndambuki, S.; Massawe, E.; Sitati, N.; et al. Population density of elephants and other key large herbivores in the Amboseli ecosystem of Kenya in relation to droughts. *J. Arid. Environ.* 2016, 135, 64–74.
74. Vorste, R.V.; Obedzinski, M.; Pierce, S.N.; Carlson, S.M.; Grantham, T.E. Refuges and ecological traps: Extreme drought threatens persistence of an endangered fish in intermittent streams. *Glob. Change Biol.* 2020, 26, 3834–3845.
75. Epstein, G.; Smale, D.A. *Undaria pinnatifida*: A case study to highlight challenges in marine invasion ecology and management. *Ecol. Evol.* 2017, 7, 8624–8642.
76. Lotze, H.K.; Tittensor, D.P.; Bryndum-Buchholz, A.; Eddy, T.D.; Cheung, W.W.L.; Galbraith, E.D.; Barange, M.; Barrier, N.; Bianchi, D.; Blanchard, J.; et al. Global ensemble projections reveal trophic amplification of ocean biomass declines with climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*

Vínculos relacionados:

- La Alianza Global Jus Semper
 - Robert H. Cowie, Philippe Bouchet, Benoît Fontaine: [La Sexta Extinción Masiva: ¿realidad, ficción o especulación?](#)
 - Manuel Casal Lodeiro: [La falacia de las renovables y el cambio climático](#)
 - William F. Lamb and Julia K. Steinberger: – [Bienestar humano y mitigación del cambio climático](#)
 - Johan Colding et al: [Los Bienes Comunes Urbanos y la Acción Colectiva Frente al Cambio Climático](#)
 - Caroline Hickman et al: [Ansiedad Climática en Niños y Jóvenes y sus Creencias sobre las Respuestas Gubernamentales al Cambio Climático](#)
 - Patrick Devine-Wright et al: [Situando a las Personas en el Centro de la Acción Climática](#)
 - Jason Hickel, Aljoša Slameršak: [Los Actuales Escenarios de Mitigación del Cambio Climático Perpetúan las Desigualdades Coloniales](#)
 - Caroline Zickgraf: [Cambio Climático y Migración: Mitos y Realidades](#)
-

- ❖ **Acerca de Jus Semper:** La Alianza Global Jus Semper aspira a contribuir a alcanzar un etos sostenible de justicia social en el mundo, donde todas las comunidades vivan en ámbitos verdaderamente democráticos que brinden el pleno disfrute de los derechos humanos y de normas de vida sostenibles conforme a la dignidad humana. Para ello, coadyuva a la liberalización de las instituciones democráticas de la sociedad que han sido secuestradas por los dueños del mercado. Con ese propósito, se dedica a la investigación y análisis para provocar la toma de conciencia y el pensamiento crítico que generen las ideas para la visión transformadora que dé forma al paradigma verdaderamente democrático y sostenible de la Gente y el Planeta y NO del mercado.
- ❖ **Autores:** **Cor A. Schipper**^{1,*}, **Titus W. Hielkema**¹ y **Alexander Ziemba**^{2, 3} — 1: Ministry of Infrastructure and Water Management, P.O. Box 2232, 3500 GE Utrecht, The Netherlands. 2: Deltares, P.O. Box 177, 2600 MH Delft, The Netherlands. 3: Applied Mathematics, Delft University of Technology, Mekelweg 2, 2628 CD Delft, The Netherlands. * Autor a quien debe dirigirse la correspondencia.
- ❖ **Acerca de este trabajo:** (Este artículo pertenece al tema Climate Change Impacts and Adaptation: Interdisciplinary Perspectives). Conceptualización, C.A.S. y T.W.H.; metodología, C.A.S. y T.W.H.; análisis formal, C.A.S. y T.W.H.; investigación, C.A.S. y T.W.H.; redacción: preparación del borrador original, C.A.S. S., T.W.H. y A.Z.; redacción: revisión y edición, C.A.S., T.W.H. y A.Z. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito. **Financiación:** Esta investigación no recibió financiación externa. **Declaración de disponibilidad de datos:** Los datos presentados en este estudio están disponibles públicamente en las Tablas A3 y A4. **Agradecimientos:** Este artículo se benefició en gran medida de los debates de evaluación de las medidas sostenibles con los colegas de RWS en el Clúster Interreg de la UE para la adaptación al cambio climático de nube a costa (C5a). Agradecemos a Vincent Escaravage (WMR) su asesoramiento con el PDA estadístico y a Alicia Hamer (WMR) su apoyo con el ajuste de la curva sigmoideal. Nos gustaría agradecer al colega Gerben Dekker (RWS) y a Berry Gersonius, así como a los colaboradores externos, por el tiempo dedicado a este manuscrito, ya que creemos que sus comentarios ayudaron a mejorar la calidad del mismo. **Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener conflictos de intereses. **Descargo de responsabilidad/Nota del editor:** Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente los del autor o autores individuales y colaboradores y no de MDPI y/o el editor o editores. MDPI y/o el editor o editores declinan toda responsabilidad por cualquier daño a personas o bienes resultante de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido. © 2024 por los autores. Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza. **Este artículo es de acceso abierto y se distribuye bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY)** (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>). **Este artículo fue publicado originalmente en inglés por Climate 2024, 12(11), 179; <https://doi.org/10.3390/cli12110179>.**
- ❖ **Cite este trabajo como:** Cor A. Schipper, Titus W. Hielkema y Alexander Ziemba: Impacto del Cambio Climático en la Biodiversidad e Implicaciones para las Soluciones Basadas en la Naturaleza. Publicado en castellano por La Alianza Global Jus Semper, mayo de 2025.
- ❖ **Etiquetas:** capitalismo, democracia, cambio climático; inundaciones; adaptación; resiliencia; biodiversidad; global; UICN; IPCC.
- ❖ La responsabilidad por las opiniones expresadas en los trabajos firmados descansa exclusivamente en su(s) autor(es), y su publicación no representa un respaldo por parte de La Alianza Global Jus Semper a dichas opiniones.



Bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>

2025. La Alianza Global Jus Semper
Portal en red: https://www.jussemp.org/Inicio/Index_castellano.html