

EDITORES. Pablo A. Marquet, Fernando Valladares,
Sandra Magro, Aurora Gaxiola & Alex Enrich-Prast

CAMBIO GLOBAL *Una mirada desde* IBEROAMÉRICA

CAMBIO GLOBAL

Una mirada desde

IBEROAMÉRICA

EDITORES

Pablo A. Marquet
Fernando Valladares
Sandra Magro
Aurora Gaxiola
Alex Enrich-Prast



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE



UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO

CAMBIO
GLOBAL
Una mirada desde
IBEROAMÉRICA

PABLO A. MARQUET
FERNANDO VALLADARES
SANDRA MAGRO
AURORA GAXIOLA
ALEX ENRICH-PRAST

EDITORES

2018



**CAMBIO
GLOBAL**
Una mirada desde
IBEROAMÉRICA

Editores:

Pablo A. Marquet, Fernando Valladares, Sandra Magro, Aurora Gaxiola, Alex Enrich-Prast

Diseño, producción y edición de imágenes:

Fernando Maldonado Roi

Diseño de portada e infografías:

Claudia Brenning, Catalina Fuentes, Claudia Gambino y Soledad Hola

Pontificia Universidad Católica de Chile

Depósito Legal: M-31792-2018

© Editado por ACCI www.acciediciones.com

San Ildefonso nº 17 Madrid 28018

ISBN: 978-84-17519-33-9

Impreso en Madrid, España

2018

TABLA DE CONTENIDOS

- 5 **Prólogo**
Juan Carlos Castilla
- 9 **Introducción**
Pablo A. Marquet, Fernando Valladares, Sandra Magro, Aurora Gaxiola, Francisco Bozinovic y Alex Enrich-Prast
- 15 **Capítulo 1. Contextualizando el Antropoceno: el Cambio Global en el pasado**
Ana Moreno, Blas Valero-Garcés y Claudio Latorre
- 31 **Capítulo 2. Población humana y uso de recursos**
Jose Luis Gonzalez-Andújar, Rosana Ferrero, Mauricio Lima, Pablo A. Marquet, Fernando Valladares y Sergio A. Navarrete
- 51 **Capítulo 3. Cambio Global y redes de intercambio comercial: no todo lo que se mueve es aparente a los ojos**
Pablo A. Marquet, Teodoro Dannemann y Aurora Gaxiola
- 69 **Capítulo 4. Predicciones de Cambio Climático en Iberoamérica**
Mariana M. Vale, Lorena Gómez-Aparicio, Juan J. Armesto, Luara Tourinho y Vinicius F. Farjalla
- 89 **Capítulo 5. Pérdida de biodiversidad: causas y consecuencias para la humanidad**
Vinicius F. Farjalla, Ricardo Coutinho, Lorena Gómez-Aparicio, Sergio A. Navarrete, Aliny P. F. Pires, Mário L. G. Soares, Anna Traveset y Mariana M. Vale
- 111 **Capítulo 6. Ciclos biogeoquímicos y cambios globales**
Alex Enrich-Prast, Aurora Gaxiola, Ana Lúcia Santoro, Jorge Durán, Alexandra Rodríguez y Humberto Marotta
- 129 **Capítulo 7. El papel regulador de los océanos en el sistema terrestre**
Josep L. Pelegrí, Humberto Marotta, Sergio A. Navarrete y Ananda Pascual
- 153 **Capítulo 8. Biogeoquímica aplicada: estudios de caso sobre la interacción entre los elementos esenciales para la vida y el Cambio Global**
Humberto Marotta, Alexandra Rodríguez, Jorge Durán, Alex Enrich-Prast y Luana Pinho
- 165 **Capítulo 9. Radiación ultravioleta: espada de doble filo**
Aurora Gaxiola, Francisco I. Pugnaire, Vinicius F. Farjalla y Miriam Fernández
- 183 **Capítulo 10. Cambios en la disponibilidad de agua y su efecto sobre el funcionamiento de los ecosistemas**
Francisco I. Pugnaire, Juan J. Armesto, Aurora Gaxiola, Pablo A. Marquet, Cristina Armas, Fernando Valladares y Olaf Malm
- 205 **Capítulo 11. Cambio Global y pesquerías**
Cristina Ruano-Chamorro, Verónica Ortiz, Juan Carlos Castilla, Sergio A. Navarrete y Stefan Gelcich
- 225 **Capítulo 12. Cambio Global y su impacto sobre las redes de interacciones ecológicas**
Anna Traveset, Miguel B. Araújo y Pablo A. Marquet
- 243 **Capítulo 13. Cambios climáticos y distribución geográfica de las especies**
Mariana M. Vale y Miguel B. Araújo
- 261 **Capítulo 14. Cambio Global en un lago costero de Chile Central durante el último milenio**
Matías Frugone-Álvarez, Claudio Latorre, Ana Moreno, Antonio Maldonado, Calogero Santoro, María Laura Carrevedo, Magdalena Fuentealba y Blas Valero-Garcés



PRÓLOGO

Han transcurrido ya 10 años desde la fundación del proyecto “Laboratorio Internacional en Cambio Global” (LINCGlobal), una iniciativa pionera de integración y colaboración científica de largo plazo en ciencias de cambio global entre investigadores de la Península Ibérica y Latinoamérica.

El LINCGlobal, inicialmente impulsado y financiado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), España y por la Universidad Católica de Chile, con una incorporación más reciente de la Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil, actualmente reúne a más de una treintena de investigadores de muy alto nivel científico en temas de cambio global.

Los fundadores tuvimos en mente la visión de establecer grupos iberoamericanos multidisciplinares y líneas conjuntas de investigación conducentes a la realización y publicación de investigaciones en temas de cambios globales relevantes en diversos ámbitos de los ecosistemas marinos y terrestres; usando para ello aproximaciones tanto experimentales, correlacionales como de modelización y de macroecología.

No menor fue la visión relacionada con impulsar y fortalecer el intercambio iberoamericano en la formación conjunta de investigadores jóvenes a nivel de doctorado y postdoctorado, la generación de nuevas fórmulas de gobernanza y sobretodo la necesaria y urgente diseminación a la sociedad de la información generada, con un nivel de comprensión adecuado. En esta década los objetivos generales de la visión y los más específicos de los distintos grupos se han cumplido más que a cabalidad y así lo demuestran los cientos de publicaciones realizadas por los investigadores del Laboratorio y las Memorias del proyecto.

Hoy, al finalizar la primera década de nuestra aventura iberoamericana en cambio global, como uno de los Directores fundadores del LINCGlobal, me es muy grato realizar el Prólogo del libro “**Cambio Global una mirada desde Iberoamérica**”. El condensa muchos de los avances en investigación realizados en la década no solo por los investigadores de plantilla del proyecto, sino que además por numerosos alumnos de doctorado, postdoctorado y colaboradores. El libro, editado por los Profesores

Estrecho de Magallanes, Chile.
Foto Fernando Maldonado



Estrecho de Magallanes, Chile. Derechos Reservados bajo Creative Commons CC0

Pablo Marquet, Fernando Valladares, Sandra Magro, Aurora Gaxiola y Alex Enrich-Prast contiene 14 capítulos en que están involucrados 50 autores iberoamericanos ligados al LINCGlobal. Los diferentes capítulos presentan una amplia cobertura de las líneas de investigación abordadas por los miembros del Laboratorio Internacional, desde contextualización de cambios globales en el pasado, la población humana, uso de los recursos y redes comerciales, hasta el papel regulador de los océanos en el sistema terrestre, la radiación ultravioleta y las pesquerías marinas. Los cambios globales en relación con los ciclos biogeoquímicos, la disponibilidad de agua, la biodiversidad y los impactos sobre las redes de interacción ecológica y la distribución de las especies son abordados y discutidos en profundidad. Finalmente se muestra un caso de estudio para los cambios globales en un lago de Chile central durante el último milenio. El esfuerzo de síntesis de los autores es loable, del mismo modo que la inclusión de infografías que permiten aprehender con facilidad los tipos de cambios globales y sus consecuencias en los ecosistemas terrestres y oceánicos.

Solo al considerar los contenidos de este libro visualizo para los integrantes del LINCGlobal al menos dos desafíos. Primero ser consecuente con la visión iberoamericana del Laboratorio y traducir el libro al portugués, para así hacer más accesible la información a estudiantes y público en general de habla portuguesa. Segundo, y mucho más desafiante, bajar y socializar la información científica contenida en él a niveles de público general y en especial para estudiantes de educación primaria y secundaria en Latinoamérica. Ello requiere, ciertamente, un esfuerzo extra significativo. Sin embargo, por ejemplo, el trabajo ya realizado en el libro con las infografías y el uso de excelentes fotografías facilitará ese camino. En ello el uso de las redes sociales no debería descartarse.

A mis amigos del Laboratorio Internacional y a los lectores y usuarios del libro: bienvenidos a la era de la ciencia post-normal, donde tanto la construcción del conocimiento y su publicación, como su diseminación y democratización hacia la sociedad, en forma simple y didáctica, representa un desafío mayor.

Santiago de Chile, septiembre 2018

Juan Carlos Castilla
Pontificia Universidad Católica de Chile



Introducción

Hace más de tres mil millones de años emerge sobre la superficie de la Tierra un nuevo estado de la materia, la materia adaptativa, la vida. Desde este “*Big Bang biótico*”, la vida se ha expandido y ha colonizado toda la superficie del planeta, desde las más altas cumbres y la atmósfera, hasta las profundidades abisales de los océanos. Esta ha sido una historia de transformaciones, donde lo vivo, o lo que denominamos el componente biótico, se ha transformado en función de las condiciones del medio físico-químico, el componente abiótico. Pero lo vivo ha transformado a su vez a lo abiótico en una danza de transformación mutua que ha dado origen a la biodiversidad que conocemos y a las condiciones físicas y químicas del planeta actual donde vivimos. Los seres humanos y en concreto *Homo sapiens*, somos un ser biológico más, producto de ésta historia de miles de millones de años, y como todo lo vivo, transformamos nuestro ambiente y éste a su vez nos transforma. Si bien es cierto que el clima y las condiciones ambientales han variado mucho por causas naturales durante la historia de la Tierra, tal y como explicamos en éste libro, las transformaciones resultantes de la actividad humana durante los últimos 10.000 años, y en particular desde mediados del siglo XX (Capítulos 1, 14), han llegado a ser de tal magnitud que *Homo sapiens* se ha convertido por sí sólo en la principal fuerza geofísica transformadora de alcance global. Esta novedad planetaria ha dado origen a los que denominamos Antropoceno, un período geológico caracterizado por la dominación de la Tierra por parte de nuestra especie (Capítulo 1).

Sin duda somos una especie exitosa. Una especie que, gracias a la evolución cultural acumulativa basada en el aprendizaje social, se ha transformado desde cazadores recolectores, con una tecnología de subsistencia e individual, hasta ciudadanos urbanos globales con una

Desierto de Tabernas,
Almería, España. Foto
Francisco I. Pugnaire

tecnología de manufactura social y compleja. El problema es que en nuestro éxito puede estar la semilla de nuestro propio colapso como especie, ya que los costos asociados a las nuevas condiciones ambientales que hemos generado, y que estamos generando, podrían limitar o impedir la vida humana tal como la conocemos. El problema es serio ya que existen signos claros de sobreexplotación a nivel global de recursos como los pesqueros (Capítulos 2, 11), de la alteración de los ciclos biogeoquímicos fundamentales para el funcionamiento de los ecosistemas (Capítulos 6, 7, 8, 9, 10), para la producción agrícola (como el ciclo del nitrógeno y del fósforo, Capítulos 2, 3, 6) y para la regulación del clima (como el ciclo del carbono y el agua, Capítulos 4, 6, 7, 10). Todo ello afecta profundamente a la biodiversidad y a las implicaciones que ésta tiene para la vida humana (Capítulos 5, 12, 13). Todo esto es, en definitiva, el cambio global, y sus motores principales son las alteraciones que nuestra especie ha tenido y tiene sobre el clima terrestre, los ciclos biogeoquímicos, la fragmentación de los paisajes y ecosistemas, así como la introducción y eliminación de especies.

Los problemas asociados al cambio global son complejos ya que aún la ciencia no es capaz de comprender bien el funcionamiento de la biósfera y las consecuencias que las alteraciones en ciertos de sus componentes podrían tener en el corto y medio plazo. Más aún, existe evidencia de que este cambio en el funcionamiento no es lineal, ya que con frecuencia pequeños cambios tienen grandes consecuencias. Este comportamiento no lineal se asocia a la existencia de umbrales que de ser transgredidos nos abocaría a cambios radicales a nivel global. Las dos características más relevantes de estos umbrales son que el sistema se comportará de forma diferente (y en general poco conocida) al sobrepasarlos y que la nueva situación es prácticamente irreversible. Además, sabemos que los distintos motores y agentes de cambio ambiental interactúan entre sí dando origen a un enjambre de efectos potenciales que se propagan a través de la biósfera y que pueden llegar de manera silenciosa a lugares inesperados, y causar grandes impactos de forma poco perceptible. Tal es el caso del decrecimiento poblacional y eventual

extinción de muchos anfibios en muchos rincones del planeta producto de una enfermedad emergente asociada al hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* y cuya emergencia y dispersión han sido facilitadas por el ser humano (e.g. redes comerciales ver Capítulo 3), el cambio climático (Capítulo 5, 13) y el incremento en la incidencia de la radiación ultravioleta (Capítulo 9).

Es claro que estamos enfrentando una crisis ambiental global sin precedentes en la historia del planeta, causada en gran medida por modelos económicos que se apoyan en el crecimiento de la economía y de la población y en una demanda creciente de productos y servicios. Para esto, nada mejor que congregarse en grandes centros urbanos; las estadísticas indican que para el 2050 cerca de dos tercios de la población mundial, y el 80% de la población de Iberoamérica, estará concentrada en centros urbanos. Los grandes centros urbanos se han convertido en importantes sumideros de recursos y energía, y en fuentes de polución de suelos, ríos, lagos y zonas costeras, dando origen a las denominadas zonas muertas en los sistemas acuáticos (Capítulos 3, 5, 7). Por definición, una demanda creciente de recursos asociada a una población mundial en aumento en un planeta finito no es sostenible. Ya hemos transformado cerca del 40% de la superficie del planeta para usos urbanos y agropecuarios, hemos eliminado los grandes peces de los océanos hasta el punto del colapso de muchas pesquerías, y hemos batido todos los récords como agente geomorfológico, movilizándolo más tierra y nutrientes cada año con nuestras actividades que la suma de todos los procesos naturales (Capítulo 3). Y todo esto seguirá en aumento. Por ejemplo, la demanda de agua incrementará en un 55% entre el 2000 y el 2050, y la arena, su extracción, movilización y reutilización, se está convirtiendo en un problema planetario. Todo esto nos hace presumir que estamos en serios problemas.

Los impactos de la actividad humana sobre el planeta no son una preocupación aislada de los científicos. Los gobiernos de la inmensa mayoría de los países ya han expresado su interés y alarma. Tanto es así que en el año

2012 se creó un panel de expertos mundiales para evaluar la magnitud, alcance y posibles soluciones al Cambio Global. Esta es la Plataforma Intergubernamental para la Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES, por sus siglas en inglés), un organismo intergubernamental independiente cuyo objetivo es fortalecer la interfaz ciencia-política para asegurar y potenciar la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad y sus servicios (Capítulo 5), y poder así asegurar el bienestar humano y la sostenibilidad de los ecosistemas que lo hacen posible.

El conjunto de lo que denominamos biósfera y geósfera conforman el denominado Capital Natural o el conjunto de activos ambientales (suelo, agua, minerales, aire y entidades vivas) que permiten el flujo de bienes y servicios. Este flujo de bienes y servicios son esenciales para la persistencia de las distintas especies, nosotros incluidos, y los conocemos como servicios ecosistémicos (SSEE). El concepto adquirió importancia con la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Millennium Ecosystem Assessment 2003). Los SSEE se definen como los servicios que las personas obtienen de los ecosistemas y el concepto ha sido expandido en el contexto del IPBES al concepto de la Contribución de la Naturaleza hacia las Personas (NCP por sus siglas en inglés). El NCP reconoce y pone énfasis en que lo que entrega la naturaleza contribuye a la vida humana lo cual para algunos grupos humanos esto puede ser considerado un servicio y para otros puede tomar otra connotación. El reconocer la diversidad de contribuciones y valoraciones tiende a ser un importante puente entre las ciencias y las humanidades. El bienestar humano está en la base de la contribución de la naturaleza hacia las personas, desde la posibilidad de tener accesos a bienes básicos como agua, alimento y materiales de construcción, hasta salud, seguridad, cohesión social, buenas relaciones, sentido de lugar y libertad de acción y decisión. Condiciones básicas que permiten que lo humano se desarrolle y mantenga sus particularidades, a saber, la generación de cultura en base al aprendizaje social.

Con este libro queremos contribuir a generar conciencia sobre el problema que representa el cambio global y la

importancia de proteger el Capital Natural para asegurar una relación más armoniosa con la naturaleza y evitar que la mayoría de las personas del planeta vivan sin acceso a ésta y a los beneficios que nos provee. Nuestro énfasis es Iberoamérica, que es el ámbito en el cual los autores realizan sus investigaciones lo cual ha sido posible gracias a una iniciativa conjunta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (CSIC), la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) y la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ), en Brasil. Esta iniciativa conjunta ha dado lugar al Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal) que con este libro celebra sus diez años de existencia. Este libro sintetiza gran parte de nuestras investigaciones y diagnósticos sobre la situación actual, el diagnóstico futuro y las herramientas que están a nuestra disposición para seguir investigando las complejidades de Cambio Global y proponer soluciones ante los múltiples desafíos que se plantean. Decidimos hacer un libro que pudiera llegar a distintas audiencias, prestando especial atención a los jóvenes en formación. Para conseguirlo, hemos incluido una infografía resumen en la mayoría de los capítulos y siempre que ha sido posible, fotografías y esquemas, los que además de un Glosario de términos, esperamos que ayuden a comprender el alcance de los cambios ambientales influidos por nuestra propia especie. Dedicamos este libro a los jóvenes de Iberoamérica. No les entregaremos un planeta en buen estado ni una sociedad sustentable, pero esperamos dejarles al menos parte del conocimiento que les permita forjar ambas cosas para sus descendientes.

Pablo A. Marquet, Fernando Valladares, Sandra Magro, Aurora Gaxiola, Francisco Bozinovic y Alex Enrich-Prast

Santiago de Chile, Madrid y Río de Janeiro,
septiembre de 2018





Bosque tropical, Costa Rica. Foto Pablo Maldonado



¿Alguna vez habías pensado que uno de los archivos más valiosos para entender el clima de nuestro planeta se esconde bajo tierra? Los espeleotemas (estalactitas y estalagmitas) forman parte de los paleoregistros que utilizamos para estudiar el cambio climático. Esta foto la tomaron nuestros colegas del Grupo de Espeleología de Badalona en 2011 en la Cueva de Sesó (Boltaña, Geoparque del Sobrarbe, Pirineo Central). Foto Jaume Mas Moiset

Contextualizando el Antropoceno: el Cambio Global en el pasado

Ana Moreno, Blas Valero-Garcés y Claudio Latorre

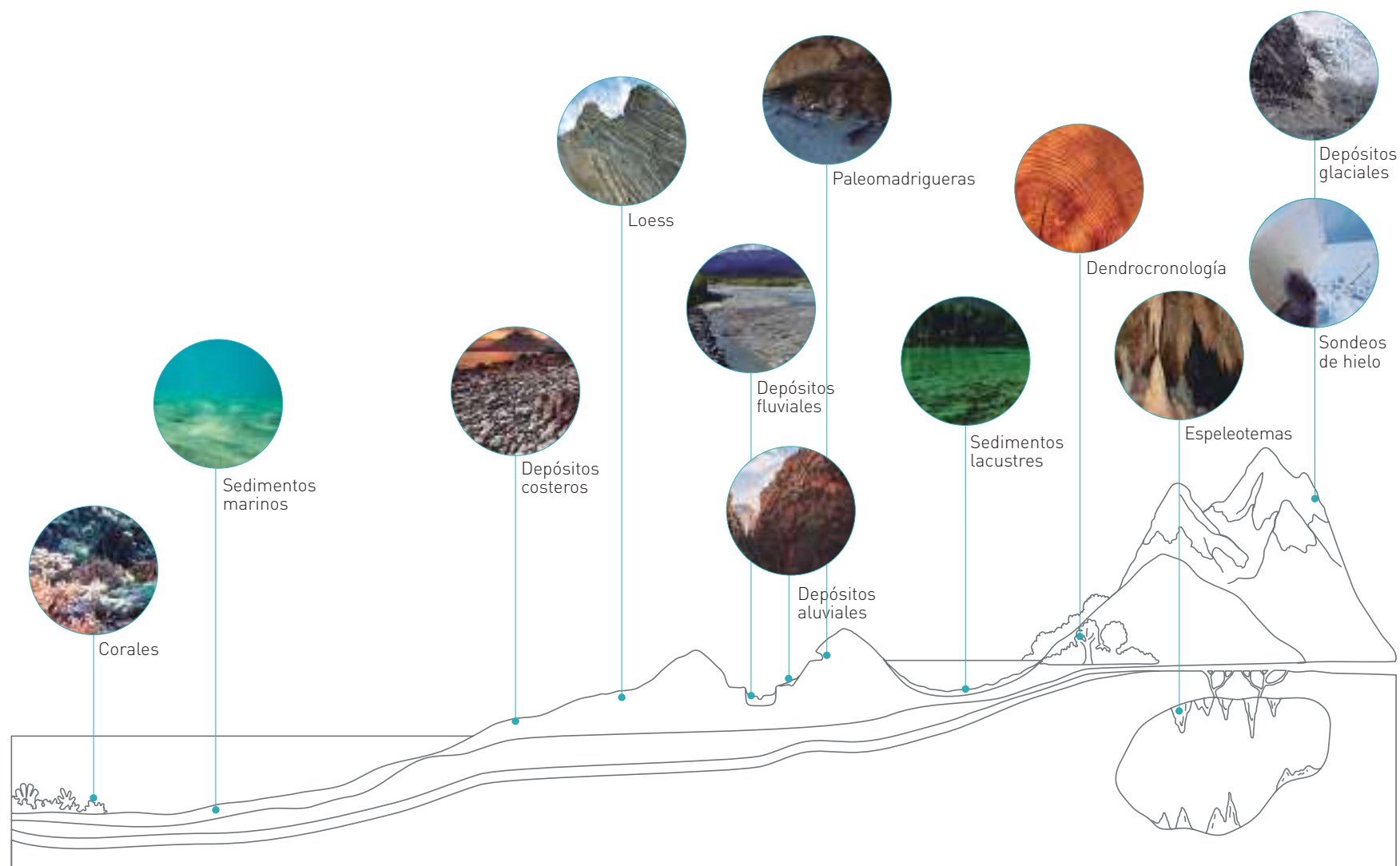
RESUMEN

La humanidad ha transformado nuestro planeta durante milenios a través de cambios en el paisaje y en los ciclos biogeoquímicos debidos al uso de recursos naturales y a actividades como la agricultura, ganadería y la minería que pueden causar impactos como contaminación de aguas y suelos y deforestación, entre otros. La magnitud y extensión de estos cambios han llevado a plantear la definición de un nuevo periodo en la escala geológica denominado Antropoceno. La información de los cambios ambientales ocurridos en los últimos milenios pueden servir como análogos del proceso de cambio climático actual. Para ello recurrimos al estudio del Cuaternario, un periodo de la historia geológica que incluye los últimos 2,5 millones de años y que se caracteriza por la sucesión de periodos glaciales e interglaciales, la aparición del Hombre Anatómicamente Moderno y la buena preservación del registro geológico. En este capítulo resumimos el estado del conocimiento sobre estos cambios abruptos durante el Cuaternario para poder así valorar la naturaleza del actual cambio climático y contextualizar el Antropoceno como un periodo único en la historia del planeta.

1. Antropoceno y Cambio Global

La humanidad ha transformado nuestro planeta durante milenios a través de cambios en el paisaje y en los ciclos biogeoquímicos debidos al uso de recursos naturales y a actividades como la agricultura, ganadería y la minería que pueden causar impactos como contaminación de aguas y suelos y deforestación, entre otros (ver Capítulos 2, 3, 5, 6). Pero es sin duda desde la Revolución Industrial y particularmente desde mediados del siglo XX cuando nuestra especie se ha convertido en un agente de cambio de primer orden a escala planetaria. Estos cambios han llevado a plantear la definición de un nuevo periodo en la escala geológica denominado Antropoceno¹. Aunque todavía sus límites están en discusión, el Antropoceno se refiere al intervalo temporal en el que muchos procesos geológicos están profundamente alterados por las actividades humanas², pudiendo considerarse al ser humano como una fuerza geológica más³.

Las repercusiones actuales de la actividad humana en los ecosistemas y los procesos geológicos superficiales en el planeta son enormes y diversas. Los procesos relacionados con el Antropoceno a escala planetaria derivan principalmente de afectaciones directas en los ecosistemas, tanto en su estructura como en su funcionamiento, de alteraciones en su biodiversidad y de la contaminación directa e indirecta de la atmósfera y la hidrósfera. Los cambios en el uso del territorio (deforestación, urbanización), la reducción y fragmentación de los hábitats,



Tipos de paleoregistros usados en la reconstrucción del clima del pasado.

la extinción de especies, las alteraciones en los ciclos biogeoquímicos, sobre todo el nitrógeno desde la síntesis química de fertilizantes y del carbono desde el uso de los combustibles fósiles, sumados a la creciente alteración del clima son ejemplos claros de nuestra importante y creciente intervención en procesos planetarios.

Antropoceno se refiere al intervalo temporal en el que muchos procesos geológicos están profundamente alterados por las actividades humanas

En Iberoamérica destacan los impactos de la paulatina urbanización del paisaje, ejemplificada por megaciudades

como México, Sao Paulo o Buenos Aires, y los derivados del uso intensivo de recursos, como el agua, en el acuífero de Ciudad de México, el suelo agrícola, en el caso de las Pampas en Argentina, o el cobre y el oro, en las explotaciones mineras en los Andes. Además, Iberoamérica ha sufrido cambios recientes en aspectos clave de ecosistemas valiosos pero vulnerables, como la eutrofización de lagos costeros en Chile y Brasil o la pérdida de biodiversidad en Amazonía (ver Capítulos 2, 5, 6, 8, 10). Esta creciente huella humana deriva en escenarios climáticos cada vez más adversos. Las predicciones regionalizadas⁴ indican aumentos de las temperaturas en las latitudes medias de Iberoamérica y en particular en las regiones andinas, con un previsible aumento en la tasa de derretimiento de los glaciares y un impacto negativo en el balance hidrológico. Los aumentos en la frecuencia e

intensidad de las sequías en Chile central y en el noreste de Brasil durante las últimas décadas son coherentes con modelos climáticos controlados por este aumento general de las temperaturas.

Sin embargo, la monitorización de los cambios ambientales y los datos instrumentales de lo que sucede en la actualidad no resultan suficientes para entender los procesos de cambio y menos aún su proyección futura, al igual que la lectura de un periódico un día aislado no nos permite entender las razones del devenir de nuestra sociedad. Los escenarios de cambio global y cambio climático están basados en parámetros físico-químicos y biológicos complejos, con numerosas interrelaciones entre ellos. El principal desafío es que se asientan en un conocimiento temporalmente limitado: nuestra observación del planeta en las últimas décadas. El ciclo del carbono y del nitrógeno, así como sus interacciones con los procesos superficiales, los cambios en la composición atmosférica y sus efectos en el clima, o las sinergias entre tipos de vegetación y el ciclo hidrológico, son procesos que se regulan a lo largo de cientos o miles de años y sus impactos se extienden sobre largos periodos de tiempo. Necesitamos interpretar los cambios en los ecosistemas o en el clima a escalas temporales mayores que las de la observación reciente. Es preciso por tanto sondear otras eras geológicas. Podemos ampliar nuestra ventana de estudio a los últimos 11.700 años (al Holoceno), por ejemplo, y así comprender los cambios acaecidos en el planeta en otras fases de cambio climático rápido. Este ejercicio nos aporta una visión temporal e “histórica” que va más allá de la inmediatez que la noticia periodística sobre el calentamiento global nos proporciona. Y ahí es precisamente donde las ciencias “paleo” nos ayudan.

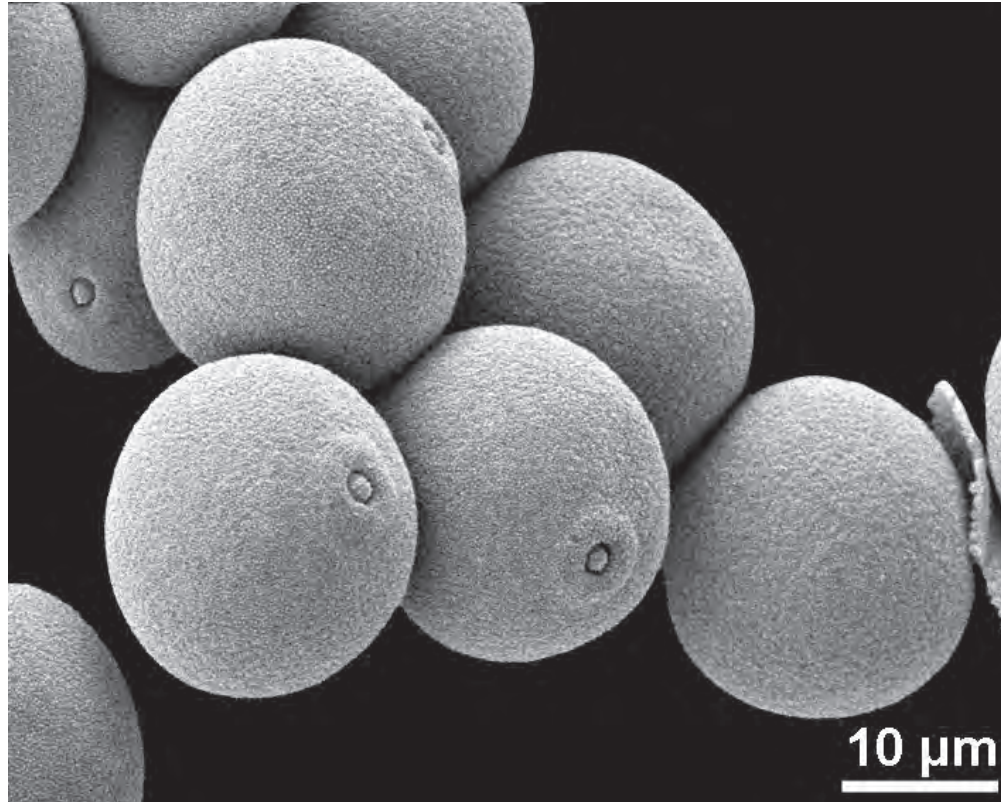
2. La importancia de los registros paleo

La información de los cambios ambientales ocurridos en los últimos milenios puede servir como análogo del proceso de cambio climático actual. Para ello recurrimos al estudio del Cuaternario, un periodo de la historia

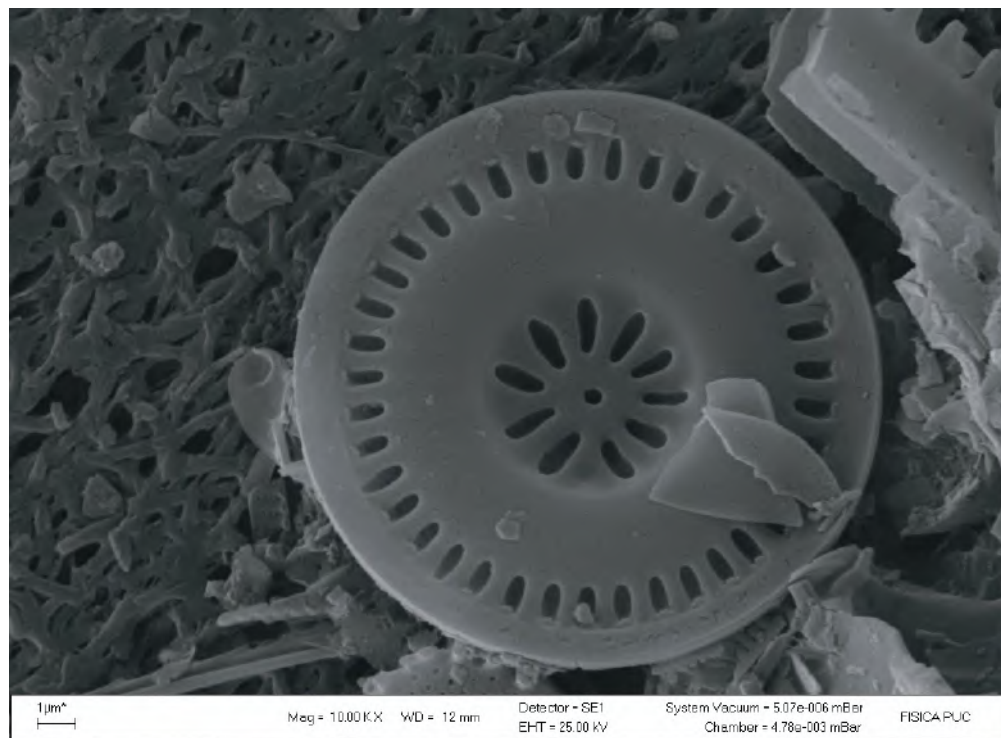
geológica que incluye los últimos 2,5 millones de años y que se caracteriza por la sucesión de periodos glaciales e interglaciales, la aparición del Hombre Anatómicamente Moderno y la buena preservación del registro geológico. Las variaciones en las condiciones ambientales correspondientes a este periodo han quedado almacenadas en forma de paleoregistros. Los anillos de crecimiento de los árboles, las burbujas de aire incluidas en el hielo de Groenlandia y de la Antártida o los sedimentos acumulados en el fondo de los lagos y el océano nos informan sobre el clima, la vegetación o la población humana y la historia de usos del territorio de épocas anteriores. Gracias a todos estos archivos conseguimos una imagen bastante nítida de los escenarios climáticos, los ambientes ecológicos y los paisajes del pasado.

Los cambios en los paisajes, ecosistemas y climas del pasado se pueden reconstruir a partir de la información albergada en archivos geológicos como los sedimentos lacustres

La utilidad de los paleoregistros depende en gran parte de que seamos capaces de asignarles una edad y de cuantificar el rango de variación del proceso que observamos. Así, no es suficiente con determinar si un clima pasado fue más seco o más húmedo, si el paisaje estaba formado por bosques o matorrales, o si hubo un periodo con mayor contaminación de metales pesados. Por el contrario es preciso cuantificar los valores de precipitación, la cobertura vegetal del suelo, o la intensidad de la deposición atmosférica responsable de esa contaminación. También es importante monitorizar los ambientes actuales y cuantificar la relación entre el indicador que podemos medir en el paleoregistro (porcentaje de polen de Pino, por ejemplo) y la variable que queremos reconstruir (porcentaje de pinos que cubren la cuenca de recepción de un lago). Entre los indicadores más utilizados destacan los indicadores de carácter biológico como el polen o los organismos del plancton marino que se utilizan en **funciones de transferencia** para las reconstrucciones cuantitativas de parámetros climáticos y ambientales del pasado.



El aumento del polen de gramíneas (imagen de microscopio electrónico de barrido de www.paldata.org, foto arriba derecha) recogido en los sedimentos de la laguna del Maule (foto izquierda), (Chile central, 2.160 msnm) se interpreta como un descenso altitudinal de la estepa andina durante la Pequeña Edad del Hielo (s.XIV-XIX). Este importante cambio ambiental se traduce en los sedimentos como un cambio en la asociación de diatomeas, con un mayor desarrollo de algunas especies como la *Discotella stelligera* (foto derecha abajo, M. L. Carrevedo), típica de aguas frías



En la reconstrucción de los cambios ambientales del pasado es imprescindible considerar la estrecha interrelación iniciada hace varios milenios entre el hombre y el ambiente. Tenemos ejemplos en Iberoamérica de cómo algunas fluctuaciones naturales del clima fueron agentes importantes implicados en el declive de grandes

civilizaciones del pasado⁵. Del mismo modo, pero en la otra dirección de esta relación hombre-ambiente, destaca el papel que jugaron los primeros pobladores de América del Sur en la extinción de la megafauna pleistocénica⁶ o el impacto en el paisaje (deforestación, urbanización) y en los recursos naturales de las grandes civilizaciones

de Mesoamérica y de Sudamérica⁷. La conquista por los españoles y portugueses, y el periodo colonial que sobrevino, supusieron, sin ninguna duda, un cambio a escala continental que afectó de manera profunda a numerosos ecosistemas⁸, que se intensificó tras la revolución industrial y que se ha acelerado aún más desde mediados del siglo XX⁹.

Sin embargo, no solo la actividad humana ha sido capaz de producir cambios rápidos en los ambientes del pasado sino que también hubo cambios naturales en el clima que ocurrieron de modo rápido o abrupto, como son por ejemplo los ciclos de Dansgaard/Oeschger. Se ha demostrado que estos periodos de cambio climático rápido han ocurrido asociados a causas que operaron de manera gradual, pero que forzaron al sistema terrestre a traspasar un cierto umbral, y al pasar ese umbral se produjo un cambio importante, brusco, rápido e irreversible en el clima¹⁰. En las siguientes secciones resumimos el estado del conocimiento sobre estos cambios abruptos durante el Cuaternario para poder así valorar la naturaleza del actual cambio climático y contextualizar el Antropoceno como un periodo único en la historia del planeta.

3. Cambio climático: una perspectiva temporal

3.1 El clima en un mundo glacial

Hace 100.000 años comenzó el último ciclo glacial durante el cual extensas zonas de la superficie de la Tierra fueron ocupadas por casquetes de hielo como respuesta al enfriamiento global del clima y, en consecuencia, se produjo una regresión marina y una disminución del nivel del mar de unos 120 m. Este periodo glacial terminó con el inicio del actual periodo interglacial, el Holoceno, hace 11.700 años. Aunque los mecanismos que causaron los ciclos glaciales Cuaternarios están aún sin esclarecer del todo, sí se sabe que se deben a cambios graduales en la insolación que llega a la Tierra, resultado de las variaciones en la órbita terrestre alrededor del sol y en la inclinación del eje de la Tierra, que son además retroalimentados por

las oscilaciones en el CO₂ atmosférico y los cambios en la circulación oceánica (la **circulación termohalina**).

La máxima extensión de los grandes casquetes glaciares de Escandinavia y Fenoscandia corresponde con el último máximo glacial que tuvo lugar hace aproximadamente 20.000 años, tal como marcan los indicadores marinos del volumen de hielo o del nivel del mar a escala global. No obstante, aún existe debate sobre si este proceso ocurrió de manera global o la respuesta de los glaciares a este cambio climático varió a nivel local. Algunos trabajos llevados a cabo en lagos y morrenas del sur de Chile indican que tanto el último máximo glacial como las etapas de la deglaciación ocurrieron en sincronía con el Hemisferio Norte y que se debieron principalmente a cambios en el contenido en gases de efecto invernadero¹¹. Por contra, los registros geomorfológicos del Pirineo¹² y de otras montañas del sur de Europa¹³ han permitido comprobar que el máximo avance de los glaciares en las cadenas alpinas del área Mediterránea fue muy anterior al último máximo glacial global. Estos datos apoyarían la hipótesis de que las variables geográficas locales son determinantes a la hora de controlar la velocidad de retirada de los glaciares de montaña y que es esperable que el impacto del actual calentamiento global en el ciclo hidrológico sea diferente para las distintas regiones del planeta.

En el último ciclo glacial el clima del Planeta se enfrió a nivel global y provocó una regresión del nivel del mar de 120 metros

Otros registros paleoclimáticos continuos han permitido detectar que existe una conexión entre los cambios en el clima acontecidos a escala local en el Hemisferio Norte y en el Hemisferio Sur. Así, los sondeos marinos obtenidos en el margen Océano Pacífico chileno demuestran una conexión muy clara entre los cambios de temperatura ocurridos en las latitudes medias del Hemisferio Sur y la Antártida, poniendo en evidencia que existe un mecanismo climático de teleconexión



La obtención de información paleoclimática implica, en muchos casos, trabajar en zonas de difícil acceso. En este caso, para muestrear sedimentos en el Lago Marboré situado a más de 2.600 m de altitud en los Pirineos tuvimos que transportar nuestra plataforma de sondeos con un helicóptero. Una vez posados sobre el lago, fuimos capaces de conseguir sedimentos lacustres que nos están revelando información excepcional sobre los últimos 14.000 años de la historia paleoambiental en el Pirineo Central. Foto Equipo PaleolPE

basado en los movimientos del cinturón de vientos del oeste (westerlies)¹⁴. Además, los trópicos han jugado un papel muy activo como desencadenantes de cambios climáticos rápidos¹⁵. Durante muchos años se pensó que las zonas de latitudes tropicales se mantuvieron estables durante el último máximo glacial y no se enfriaron como el resto del planeta. Sin embargo, gracias a estudios más recientes realizados en los trópicos se sabe que los mares tropicales se enfriaron, lo que generó variaciones en los patrones de precipitación y por ende cambios en el clima en tierra firme¹⁶. Esta sucesión de cambios climáticos abruptos –denominados ciclos de Dansgaard/Oeschger– es precisamente un aspecto importante del periodo glacial que tuvo grandes impactos en multitud de ecosistemas a escala global. Los ciclos de Dansgaard/Oeschger se caracterizan por un calentamiento abrupto seguido de un enfriamiento más gradual que parece responder al desequilibrio en la **circulación termohalina** generado por la entrada de agua dulce en el Atlántico Norte^{17,18} (ver Capítulo 7). A su vez, las variaciones en la **circulación termohalina** pueden dar lugar a escenarios climáticos muy distintos a través de su efecto sobre los ciclos hidrológicos^{19,20}. Por ejemplo, si esta circulación se llega a ralentizar, se generaría una anomalía cálida en las aguas superficiales del Atlántico Sur subtropical que conllevaría una intensificación del monzón sudamericano y, por tanto, mayores lluvias en el sur de Brasil. Por el contrario, el enfriamiento del Atlántico Norte como consecuencia de un descenso en la formación de agua profunda induciría un debilitamiento del monzón asiático y reduciría las precipitaciones en China.

En la Península Ibérica, los procesos de teleconexión climática con las latitudes más altas se manifiestan a escalas de cientos de años. Estos fenómenos son la consecuencia tanto de la influencia oceánica en el clima como de la dinámica atmosférica. Así, los ciclos Dansgaard/Oeschger se evidencian en primer lugar como cambios térmicos de las aguas superficiales marinas²¹ y, posteriormente, como cambios en el transporte de los vientos saharianos hacia la Península, lo que se traduce en variaciones en las condiciones de aridez-humedad²². Del mismo modo, esta secuencia

de variaciones climáticas rápidas relacionadas con los cambios climáticos producidos en el Atlántico Norte, genera cambios en la vegetación de la Península²³. En conclusión, los ciclos de Dansgaard/Oeschger son un claro ejemplo de cambios climáticos rápidos con alcance global y repercusiones en todos los ecosistemas de nuestro planeta por lo que el estudio de los mecanismos que los dispararon, las retroalimentaciones y las sucesivas respuestas desencadenadas está contribuyendo a comprender mejor el cambio climático actual.

3.2 El clima en un mundo cálido: el Holoceno

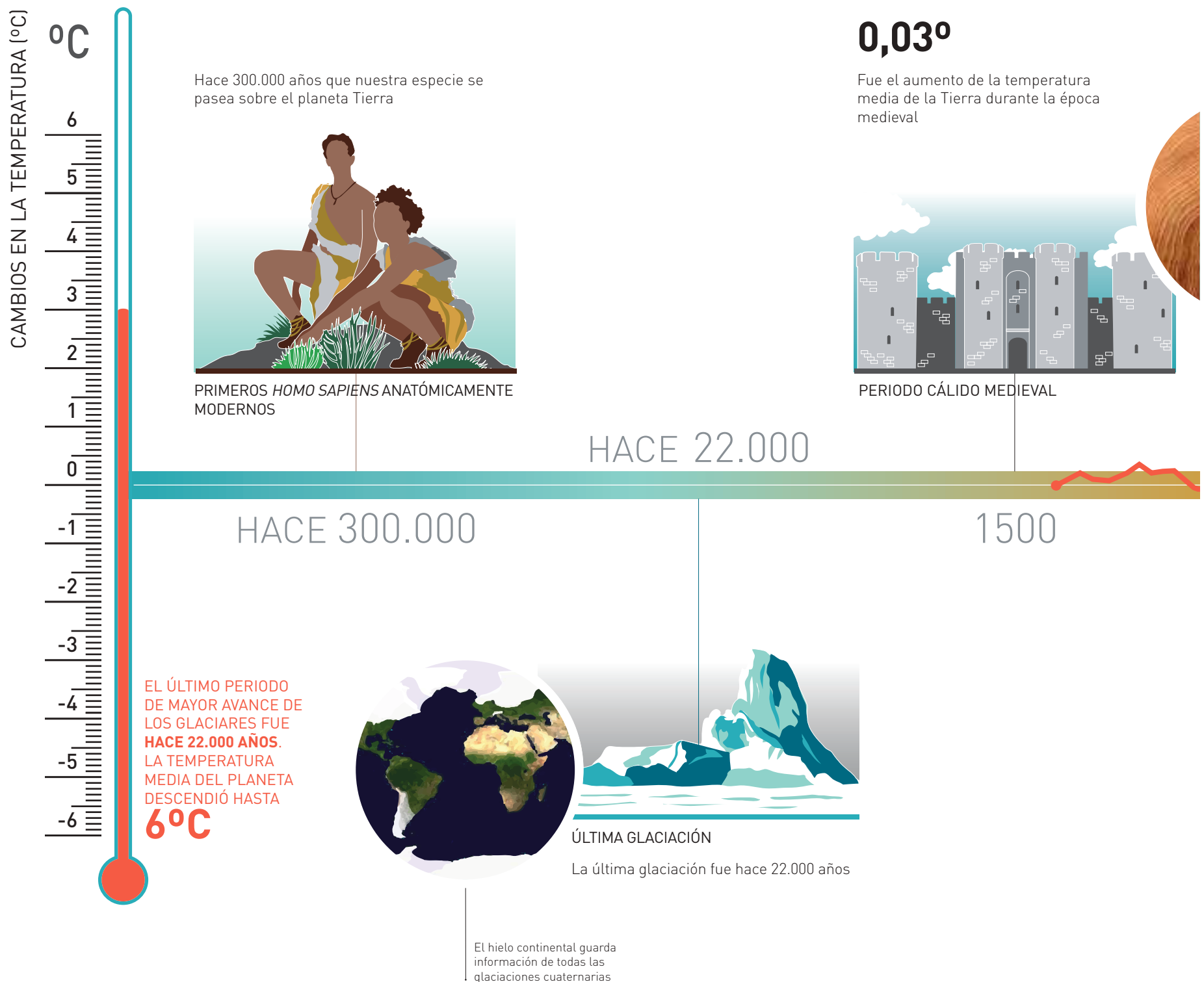
Como indicamos anteriormente, los últimos 11.700 años de la vida del planeta se corresponden con el Holoceno, el periodo interglacial actual que se caracteriza por ser cálido y relativamente húmedo en comparación con el estadio glacial anterior. La transición del periodo glacial al actual interglacial se conoce como deglaciación y supuso el último gran cambio climático a escala global. Este periodo se caracterizó por un aumento generalizado de las temperaturas, de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y de cambios oceánicos y atmosféricos, cuyos efectos y duración fueron variables a nivel regional. La caracterización precisa de estos procesos atmosféricos y/o marinos responsables de la transmisión de cambios climáticos globales es imprescindible de cara a poder comprender tanto las variaciones climáticas en épocas pasadas como las que ocurren en la actualidad.

El estudio de las manifestaciones del Holoceno en Iberoamérica muestran una Era marcada principalmente por cambios en el ciclo hidrológico. Así, en la región Mediterránea de Chile central²⁴ se ha identificado un Holoceno Temprano seco (hace unos 8.000 años aprox.), seguido de un aumento progresivo de la humedad hasta el Holoceno medio (hace 6.000 años) que derivó en un periodo relativamente más seco para finalmente alcanzar un cambio definitivo hacia condiciones más húmedas hace unos 4.000 años. El periodo más seco del Holoceno medio se manifestó tanto en latitudes tropicales como intermedias. Y en él se registraron las máximas temperaturas en el Pacífico sur²⁵.

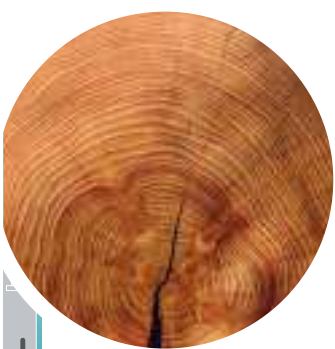
CONTEXTUALIZANDO EL ANTROPOCENO

EL CAMBIO GLOBAL EN EL PASADO

El cambio climático ha sido una constante en la historia de nuestro planeta. Sin embargo, desde mediados del siglo XX, la actividad humana se ha convertido en un factor fundamental en los cambios en el clima y los ecosistemas que observamos hoy. Sólo comprendiendo los cambios del pasado podemos evaluar la importancia de las variaciones que percibimos en el presente.



La huella del periodo cálido medieval ha quedado impresa en los anillos de los árboles



Comenzó una nueva etapa geológica: el Antropoceno



ANTROPOCENO

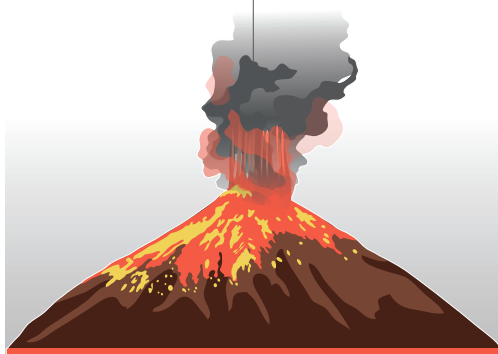
15°C

TEMPERATURA MEDIA DE LOS ÚLTIMOS 10.000 AÑOS

1816

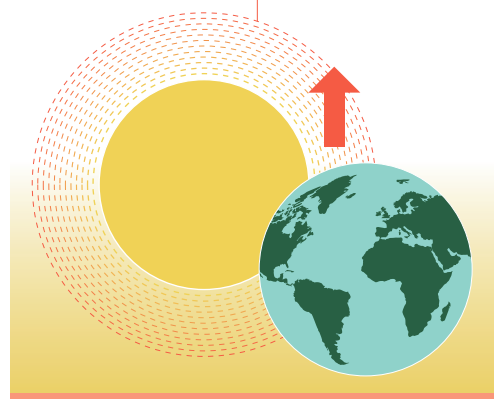
1950

2016



EL AÑO SIN VERANO

Las erupciones volcánicas emitieron toneladas de cenizas a la atmósfera. La radiación solar disminuyó tanto que la temperatura del planeta bajó casi un grado



AÑO MÁS CÁLIDO DE LA HISTORIA

En el Altiplano Chileno esta crisis de aridez ha quedado recogida en los sedimentos depositados en los niveles más bajos de lagos como el Chungará²⁶ o el Titicaca²⁷, en registros de paleomadrigueras²⁸ y en los patrones de ocupación humana²⁹. Asimismo, la evolución en los patrones de humedad durante el Holoceno se ha descrito también en otras partes del planeta y se ha asociado al progresivo aumento en la insolación durante el verano del Hemisferio Sur y el invierno del Hemisferio Norte. Estos cambios de insolación se deben fundamentalmente a variaciones en la posición de la órbita terrestre y parecen haber modulado también el patrón del ENSO y la Pacific Decadal Oscillation (PDO) a lo largo del Holoceno en Sudamérica. La huella de tales cambios permanecen en los sedimentos de la laguna de Pallcacocha en Ecuador³⁰ y la laguna de Acuelo en Chile²⁴.

En Iberoamérica el Holoceno se presenta como un periodo de cambio climático caracterizado por una secuencia de periodos húmedos y secos

El último milenio, que correspondería con el ciclo más reciente de variabilidad climática del Holoceno, incluye dos periodos muy importantes de nuestra historia climática: la Anomalía Climática Medieval (ACM) (900-1300 años CE) y la Pequeña Edad del Hielo (PEH) (1300-1850 años CE). Estas fases climáticas representan los últimos “grandes” cambios climáticos no relacionados directamente con causas antrópicas antes del actual calentamiento global. Los cambios durante la PEH se han achacado al descenso de la insolación debido a cambios en la actividad solar y a un aumento generalizado de la actividad volcánica. En este sentido se sabe que la explosión del volcán Tambora en Indonesia en 1815 d.C. expulsó una enorme cantidad de cenizas a la atmósfera generando el conocido efecto de “invierno volcánico,” debido al cual en el año 1816 d.C. no hubo un auténtico verano. Además, tal y como evidencian las mediciones realizadas entonces por diferentes astrónomos y que han quedado reflejadas en documentos históricos, el número de **manchas solares** –y por lo tanto la actividad solar– fue menor durante la PEH

que en la ACM. Estos periodos de mínimos de actividad solar coinciden con décadas especialmente frías lo que llevó a pensar que había una relación entre el número de **manchas solares** y el clima de nuestro planeta. Recientemente se ha demostrado esta relación causal al observarse cambios significativos en la circulación atmosférica (por ejemplo en la intensidad de los vientos contralisios) asociados a los ciclos solares de 11 años derivados del número de **manchas solares**.

En el caso de Iberoamérica, las variaciones en la radiación solar y su influencia en diversos fenómenos climáticos como el ENSO o la Oscilación del Atlántico Norte, parecen explicar la variabilidad hidroclimática de la PEH que se manifiesta a través de las fases húmedas en el Altiplano o las temperaturas más elevadas en Chile central. Los impactos de estas fases climáticas quedan recogidas en los testigos de hielo de los glaciares andinos³¹, los anillos de los árboles³², incluso las paleomadrigueras³³ o los sedimentos de los lagos³⁴. Así, por ejemplo, gracias al estudio de los pigmentos acumulados en los sedimentos de la laguna Acuelo de Chile Central sabemos con exactitud el cambio térmico que supuso la entrada a la PEH tras un periodo más cálido como fue la ACM³⁵. Por su parte, se sabe que en el Altiplano chileno las fases más húmedas durante la ACM favorecieron el desarrollo de sociedades humanas en altitudes medias³⁶ reforzando de nuevo esa relación hombre-clima importante desde hace ya varios milenios.

4. Retos futuros

Tras este repaso histórico sigue sobrevolando la pregunta de si verdaderamente los cambios ambientales anteriores son equiparables al que vivimos hoy en día. A pesar de que los cambios en el uso del suelo o en los procesos de deforestación asociados a la conquista española y la época de la colonia tuvieron una magnitud similar a los cambios actuales, lo cierto es que las afecciones al ciclo hidrológico por grandes obras de infraestructura o el impacto sobre los ciclos biogeoquímicos que han tenido lugar en el último siglo no tienen parangón en el pasado.

Respecto al calentamiento global actual, no encontramos en los paleoregistros cuaternarios un análogo de las elevadas concentraciones de gases de efecto invernadero de hoy en día. La tasa de cambio de la temperatura debida al calentamiento actual podría equipararse a la de una transición glacial-interglacial, sin embargo se ha producido en un periodo mucho más corto y su velocidad es, por tanto, significativamente mayor. Además las causas de los cambios climáticos históricos y los actuales también son distintas. Mientras que los periodos más cálidos durante el Holoceno se debieron principalmente a cambios en la actividad solar, el calentamiento global actual se debe a causas antrópicas (fundamentalmente a la quema de combustibles fósiles) y se ha manifestado en sólo 100 años. Es sin duda la rapidez con la que está ocurriendo el calentamiento global actual lo que lo diferencia de periodos de cambio “natural” anteriores y, además, lo que más preocupación genera en la comunidad científica. El traspasar un determinado umbral en el sistema climático puede conllevar el desencadenamiento en cadena de procesos conectados con la temperatura atmosférica provocando cambios aún mayores que los actuales en el ciclo hidrológico, en los ciclos biogeoquímicos o en la biodiversidad de nuestros ecosistemas con consecuencias todavía impredecibles.

A pesar de que los cambios ambientales y climáticos ocurridos en el pasado no parecen ser comparables en magnitud o rapidez con los actuales, el estudio de los procesos climáticos históricos puede ayudarnos a interpretar las variaciones actuales pudiendo identificar las respuestas ambientales esperables. Sin embargo la escasez de estudios paleoclimáticos y reconstrucciones cuantitativas del clima del pasado reciente dificulta esta labor. El reto principal hoy en día es, por tanto, conocer los mecanismos de la variabilidad climática a diferentes escalas temporales y sus impactos, en particular durante eventos de cambio climático rápido. Además, la calibración de indicadores y los estudios de monitorización de ecosistemas a largo plazo, son también aspectos fundamentales para poder presentar reconstrucciones cuantitativas del clima y

los ecosistemas del pasado. Por último, cabe destacar el papel fundamental del trabajo conjunto entre los generadores de los datos y los modelizadores climáticos y del mismo modo, la colaboración con arqueólogos e historiadores que permita valorar la influencia de la variabilidad climática en la evolución cultural y económica de las sociedades humanas desde los últimos milenios hasta el Antropoceno.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 Crutzen, P. J. Geology of mankind. *Nature* 415, 23–23 (2002).
- 2 Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P. & McNeill, J. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369, 842–867 (2011).
- 3 Hooke, R. L. & Martín-Duque, J. F. Land transformation by humans: A review. *GSA Today* 12, 4–10 (2012).
- 4 Magrin, G. O. *et al.* in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 1499–1566, Cambridge University Press (2014).
- 5 Haug, G. H. *et al.* Climate and the collapse of Maya Civilization. *Science* 299, 1731–1735 (2003).
- 6 American Megafaunal Extinctions at the End of the Pleistocene. (Springer Netherlands, 2009).
- 7 McKey, D. *et al.* Pre-Columbian agricultural landscapes, ecosystem engineers, and self-organized patchiness in Amazonia. *Proc Natl Acad Sci U S A* 107, 7823–7828 (2010).
- 8 Belknap, D. F. & Sandweiss, D. H. Effect of the Spanish Conquest on coastal change in Northwestern Peru. *PNAS* 111, 7986–7989 (2014).
- 9 *Climate change 2014: Synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change* (2014).
- 10 Alley, R. B. *et al.* Abrupt Climate Change. *Science* 299, 2005–2010 (2003).
- 11 Denton, G. H. *et al.* Interhemispheric linkage of paleoclimate during the Last Glaciation. *Geografiska Annaler* 81, 107–152 (1999).
- 12 García-Ruiz, J. M., Valero-Garcés, B. L., Martí-Bono, C. & González-Sampériz, P. Asynchronicity of maximum glacier advances in the central Spanish Pyrenees. *Journal of Quaternary Science* 18, 61–72 (2003).
- 13 Hughes, P. D. & Woodward, J. C. Timing of glaciation in the Mediterranean mountains during the last cold stage. *Journal of Quaternary Science* 23, 575–588 (2008).
- 14 Lamy, F. *et al.* Antarctic timing of surface water changes off Chile and Patagonian Ice Sheet response. *Science* 304, 1959–1962 (2004).
- 15 Koutavas, A., Lynch-Stieglitz, J., Marchitto, T. M. & Sachs, J. P. El Niño-like pattern in ice age tropical Pacific sea surface temperature. *Science* 297, 226–230 (2002).
- 16 Baker, P. A. & Fritz, S. C. Nature and causes of Quaternary climate variation of tropical South America. *Quaternary Science Reviews* 124, 31–47 (2015).

- 17 Rahmstorf, S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419, 207–214 (2002).
- 18 Voelker, A. Global distribution of centennial-scale records for marine isotope stage (MIS) 3: a database. *Quaternary Science Reviews* 21, 1185–1212 (2002).
- 19 Cruz, F. W. *et al.* Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. *Nature* 434, 63–66 (2005).
- 20 Wang, X. *et al.* Millennial-scale precipitation changes in southern Brazil over the past 90,000 years. *Geophys. Res. Lett.* 34, L23701 (2007).
- 21 Cacho, I. *et al.* Dansgaard-Oeschger and Heinrich event imprints in Alboran Sea temperatures. *Paleoceanography* 14, 698–705 (1999).
- 22 Moreno, A. *et al.* Saharan dust transport and high latitude glacial climatic variability: the Alboran Sea record. *Quaternary Research* 58, 318–328 (2002).
- 23 Sánchez-Goñi, M. F. *et al.* Synchronicity between marine and terrestrial responses to millennial scale climatic variability during the last glacial period in the Mediterranean region. *Climate Dynamics* 19, 95–105 (2002).
- 24 Jenny, B. *et al.* Early to Mid-Holocene aridity in central Chile and the Southern Westerlies: the Laguna Aculeo record (34°S). *Quaternary Research* 58, 160–170 (2002).
- 25 Lamy, F. *et al.* Holocene changes in the position and intensity of the southern westerly wind belt. *Nature Geosci* 3, 695–699 (2010).
- 26 Moreno, A. *et al.* A 14-kyr record from the tropical Andes: the Lago Chungara sequence (18°S, northern Chilean altiplano). *Quaternary International* 161, 4–21 (2007).
- 27 Baker, P. A. *et al.* The history of South American tropical precipitation for the past 25,000 years. *Science* 291, 640–643 (2001).
- 28 Latorre, C., Betancourt, J. L. & Arroyo, M. T. K. Late Quaternary vegetation and climate history of a perennial river canyon in the Rio Salado basin (22°S) of Northern Chile. *Quaternary Research* 65, 450–466 (2006).
- 29 Moreno, A., Santoro, C. M. & Latorre, C. Climate constraints on human occupation over the last 12,000 years in the northernmost Chilean Altiplano: the Lago Chungará and Hakenasa Cave records. *Journal of Quaternary Science* 24, 373–382 (2009).
- 30 Moy, C. M., Seltzer, G. O., Rodbell, D. T. & Anderson, D. M. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature* 420, 162–165 (2002).
- 31 Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Dansgaard, W. & Grootes, P. The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya Ice Cap. *Science* 234, 361–364 (1986).
- 32 Villalba, R. *et al.* Large-Scale Temperature Changes across the Southern Andes: 20th-Century Variations in the Context of the Past 400 Years. *Climatic Change* 59, 177–232 (2003).
- 33 Valero-Garcés, B. L. *et al.* Patterns of regional hydrological variability in central-southern Altiplano (18°–26°S) lakes during the last 500 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194, 319–338 (2003).
- 34 Gayo, E. M., Latorre, C., Santoro, C. M., Maldonado, A. & De Pol-Holz, R. Hydroclimate variability in the low-elevation Atacama Desert over the last 2500 yr. *Clim. Past* 8, 287–306 (2012).
- 35 von Gunten, L., Grosjean, M., Rein, B., Urrutia, R. & Appleby, P. G. A quantitative high-resolution summer temperature reconstruction based on sedimentary pigments from Laguna Aculeo, central Chile, back to AD 850. (2009). Available at: <http://hol.sagepub.com/content/19/6/873.short>. (Accessed: 5th February 2016)
- 36 Latorre, C. *et al.* Late Pleistocene human occupation of the hyperarid core in the Atacama Desert, northern Chile. *Quaternary Science Reviews* 77, 19–30 (2013).
- 37 Boninsegna, J. A. *et al.* Dendroclimatological reconstructions in South America: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281, 210–228 (2009).

REFERENCIAS COMENTADAS

Hooke, R. L. & Martín-Duque, J. F. Land transformation by humans: A review. *GSA Today* 12, 4–10 (2012).

Este artículo se centra en la transformación del paisaje y de los usos del suelo como unos de los procesos fundamentales en el cambio global y define al ser humano como el principal agente geomorfológico que modifica la superficie terrestre actualmente. Tras una revisión de los problemas asociados a la superpoblación y al desarrollo urbanístico (erosión, falta de tierras cultivables, baja calidad de la tierra) los autores proponen algunas soluciones para conducirnos hacia un impacto humano en la Tierra más sostenible. Este artículo aporta muchos temas para el debate y la reflexión que como seres que habitan un planeta de recursos finitos deberíamos hacernos.

Lamy, F. *et al.* Antarctic timing of surface water changes off Chile and Patagonian Ice Sheet response. *Science* 304, 1959–1962 (2004).

Este trabajo se basa en el estudio de diferentes indicadores geoquímicos analizados en sedimentos marinos del margen chileno cubriendo el intervalo temporal entre 10.000 y 15.000 años. Su importancia radica en que se ponen de manifiesto una relación temporal sincrónica entre las temperaturas marinas de las costas chilenas a 41°S de latitud y los cambios térmicos de la Antártida durante el último ciclo glacial. Hasta la presentación de este trabajo, se había considerado que los cambios climáticos rápidos, como los ciclos de Dansgaard/Oeschger, tenían su origen en las altas latitudes del Hemisferio Norte y se relacionaban directamente con la ralentización/reactivación de la circulación termohalina. A partir de Lamy *et al.* (2004) se constata que los cambios de escala milenaria documentados en los sondeos de hielo Antárticos se extendieron hacia las latitudes medias del Hemisferio Sur y afectaron a los patrones principales de circulación oceánica y atmosférica. De este modo, se sugiere que hubo un patrón climático común a escala del Hemisferio Sur durante el último ciclo glacial con las consiguientes repercusiones en la optimización de los modelos climáticos.

Haug, G. H. *et al.* Climate and the collapse of Maya Civilization. *Science* 299, 1731–1735 (2003).

El excelente registro del contenido en Titanio en los sedimentos de la Cuenca del Cariaco (Mar Caribe, Venezuela) permite reconstruir con resolución estacional las variaciones en el aporte fluvial y en el ciclo hidrológico de la zona tropical de Sudamérica. Uno de los aspectos más relevantes de este estudio y otros posteriores en la misma cuenca es la relación que permite establecer entre los cambios climáticos y el colapso de civilizaciones. En concreto, Haug *et al.*, indican en este trabajo que la desaparición de la cultura Maya ocurrió durante un periodo de grandes sequías que, probablemente, contribuyeron negativamente al estrés social acabando así con dicha civilización.

Cacho, I. et al. Dansgaard-Oeschger and Heinrich event imprints in Alboran Sea temperatures. *Paleoceanography* 14, 698–705 (1999). Los sondeos de sedimentos del Mar de Alborán representan la primera evidencia de cambios climáticos abruptos del último ciclo glacial en la zona Mediterránea. De cara a entender el cambio climático actual, especialmente sus impactos a lo largo del planeta y la secuencia de mecanismos que se retroalimentan y desencadenan al aumentar la temperatura, es fundamental controlar las repercusiones a escalas regionales de otros cambios climáticos rápidos del pasado, como son, en este caso, los ciclos Dansgaard/Oeschger y los Eventos de Heinrich. En este trabajo se observa, además, cómo fue la estructura de dichos cambios climáticos, que con una recurrencia de aproximadamente 1500 años, se caracterizaron por un calentamiento muy rápido (pocas decenas de años) en la temperatura superficial marina del Mediterráneo Occidental (unos 2°C grados) y posteriormente por un enfriamiento más gradual. Los impactos en los ecosistemas marinos y terrestres de estos ciclos son enormes y ampliamente documentados en la literatura.

Villalba, R. et al. Large-Scale Temperature Changes across the Southern Andes: 20th-Century Variations in the Context of the Past 400 Years. *Climatic Change* 59, 177–232 (2003).

Este trabajo presenta una reconstrucción de temperaturas para los últimos 400 años basada en el estudio del espesor de los anillos de los árboles en varias zonas de los Andes. Es destacable la posibilidad que ofrecen los estudios de dendrocronología para comparar cambios térmicos del pasado con la variación de temperatura de las últimas décadas, constatando claramente que las temperaturas tan cálidas que se han alcanzado en el siglo XX son anómalas en el contexto de los últimos 400 años. Además, se pone en evidencia que la rapidez del cambio térmico actual es también la mayor del periodo estudiado, como se había determinado previamente en otros estudios del Hemisferio Norte.

GLOSARIO

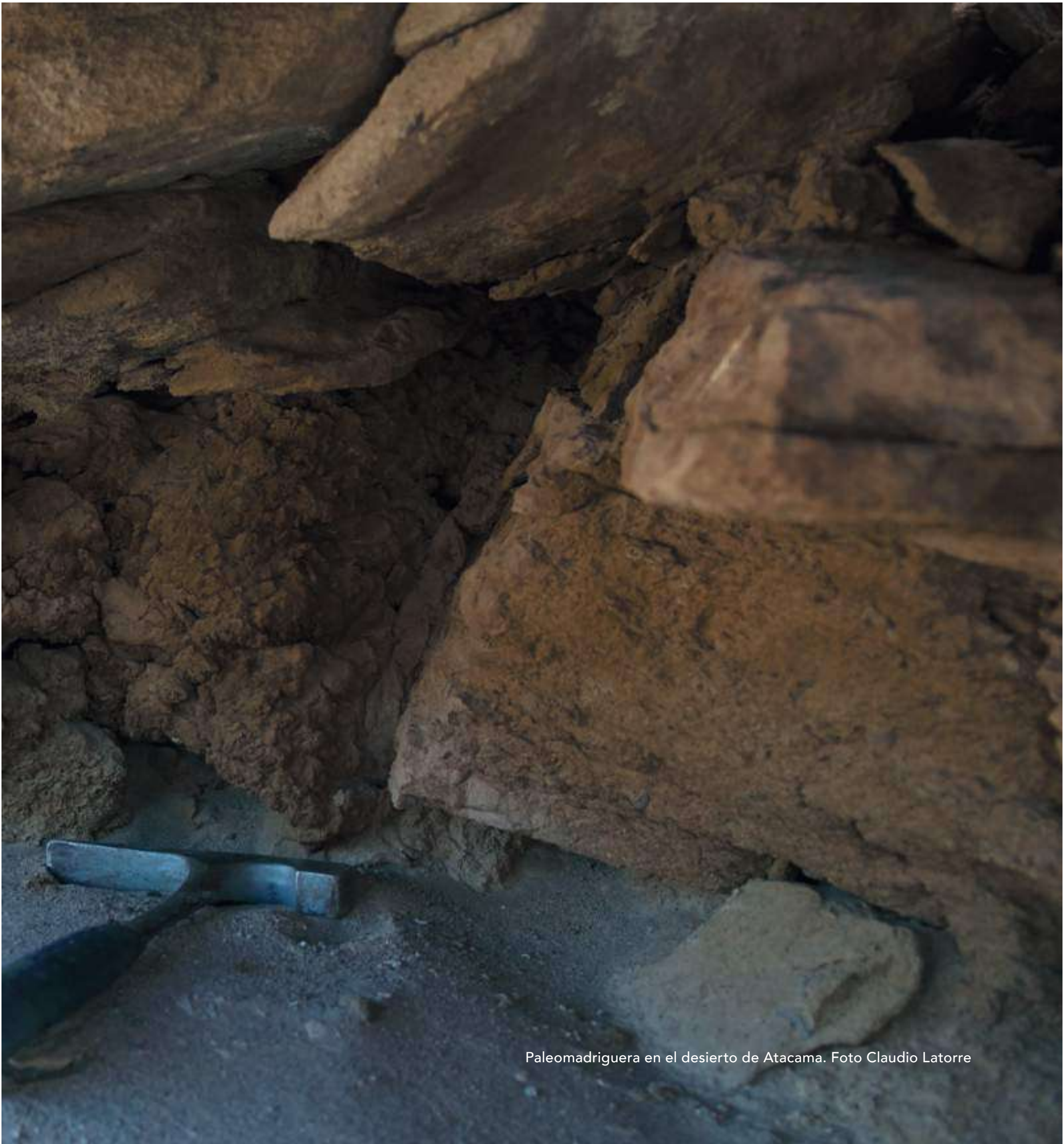
Circulación termohalina. Así se conoce a la parte del sistema de circulación oceánica global que está controlada por los gradientes de densidad entre las masas de agua del océano, debidos estos gradientes al aumento de temperatura en las aguas superficiales y a los aportes de agua dulce tanto fluviales como de fusión de los casquetes polares. Esta circulación, conocida también como “conveyor belt” en inglés, es responsable del transporte de energía (como calor) y de materia (sólidos, sustancias disueltas, gases) alrededor del globo por lo que el estado de esta circulación (ralentizada o intensificada) tiene un papel fundamental en el clima del planeta.

Dendrocronología. Es la disciplina que se basa en el conteo de las capas anuales de los árboles, es decir, los anillos de crecimiento, para establecer una cronología. Se aplica en Paleoecología, Paleoclimatología y es muy útil para mejorar las calibraciones de las dataciones por ¹⁴C. Hasta la fecha, y para el Hemisferio Norte, las cronologías obtenidas por este método se extienden hasta hace 13.900 años.

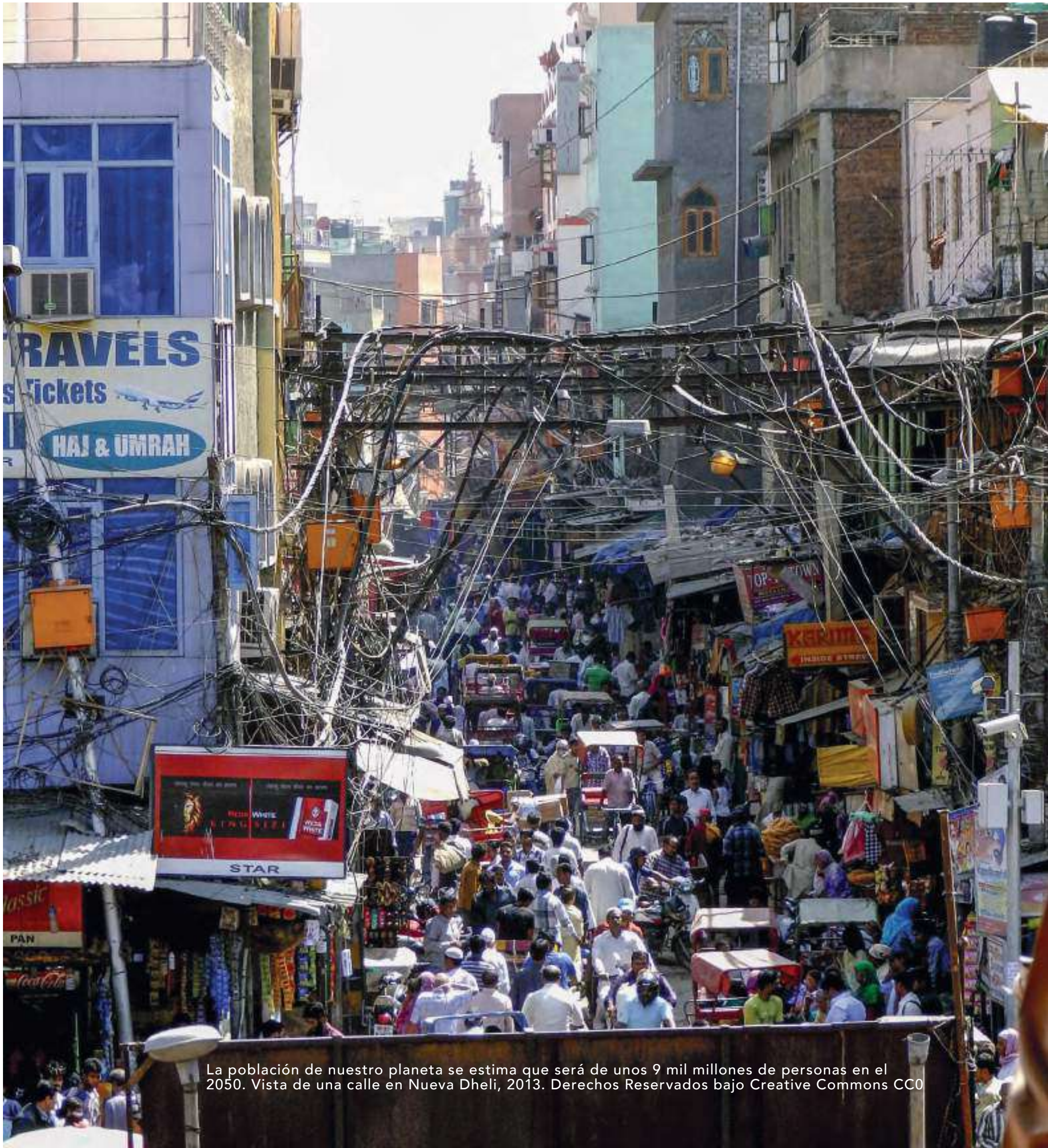
Funciones de transferencia. Son expresiones matemáticas que, en paleoecología, se utilizan para obtener variables climáticas y ambientales de un modo cuantitativo a partir de las asociaciones de determinados organismos (eg. Diatomeas, Quironómidos, Foraminíferos, etc). Su mayor precisión está estrechamente asociada al conocimiento de las asociaciones actuales y a su relación con los parámetros que se pretende reconstruir (es decir, el rango de temperatura, precipitación, pH, alcalinidad, etc al que vive una determinada especie). Por ejemplo, la técnica de Análogos Modernos, una función de transferencia muy utilizada en Palinología (reconstrucción paleoambiental a partir del contenido polínico), se basa en determinar el grado de similitud entre las comunidades vegetales y sus tipos de polen para lugares donde se conocen los parámetros climáticos con respecto a las muestras de polen fósil donde esos parámetros climáticos se quieren estimar.

Manchas solares. Son regiones del Sol que tienen una temperatura más baja que sus alrededores, y con una intensa actividad magnética. Una sola mancha puede llegar a medir hasta 12.000 km (casi tan grande como el diámetro de la Tierra), pero un grupo de manchas puede alcanzar 120.000 km de extensión e incluso algunas veces más. Su número se ha medido desde el siglo XIX y enseguida fue evidente la presencia de ciclos (11, 80 y 200 años) y su papel en el clima puesto que periodos con menor número de manchas solares corresponden con periodos de clima frío (por ejemplo, el Mínimo de Maunder con la Pequeña Edad del Hielo). La concentración de algunos isótopos radioactivos, como el ¹⁴C o el ¹⁰Be, varía según la radiación solar por lo que la medida de estos isótopos en registros paleoclimáticos (por ejemplo sondeos de hielo) permite estimar el número de manchas solares hasta 11.000 años atrás.





Paleomadriguera en el desierto de Atacama. Foto Claudio Latorre



La población de nuestro planeta se estima que será de unos 9 mil millones de personas en el 2050. Vista de una calle en Nueva Dheli, 2013. Derechos Reservados bajo Creative Commons CC0

Población humana y uso de recursos

José L. González Andújar, Rosana Ferrero, Mauricio Lima,
Pablo A. Marquet, Fernando Valladares y Sergio A. Navarrete

RESUMEN

Uno de los mayores retos de la humanidad para el siglo XXI es cubrir la demanda de alimento ante una población mundial en crecimiento con recursos limitados y amenazada por el cambio climático. La agricultura es una fuente directa de alimentos, fibra y **biocombustibles**. Iberoamérica es hoy un polo de producción agraria en crecimiento y expansión. En las últimas dos décadas, la región ha aumentado significativamente su participación en la producción mundial de alimentos, contribuyendo con el 11%. Por otro lado, la ganadería tiene una función clave en Iberoamérica y contribuye con el 46 % del PIB Agropecuario, y ha crecido a una tasa anual de 3,7%, superior a la tasa promedio de crecimiento mundial. La región genera el 13% de la producción global de carne y más del 10% de la producción de huevos y leche mundial. Sin embargo, el crecimiento del sector agropecuario y forestal, ha venido acompañado de impactos negativos sobre el ambiente y los recursos naturales, como es el caso del sobrepastoreo y la deforestación como consecuencia de la expansión de los pastizales y la frontera agrícola. De manera similar, el estado actual de las pesquerías industriales en Iberoamérica no es alentador. Como ocurre con la mayoría de las pesquerías industriales de todo el mundo, las grandes pesquerías Iberoamericanas muestran claros signos de sobreexplotación. Parte de la solución, sin embargo, pasa por minimizar los impactos negativos y globales que tiene la actividad industrial asociada al uso de recursos. Pero esto no es simple, pues involucra cambios desde el cómo se comportan los individuos hasta las instituciones, y lo que es más complejo aún, cambios económicos o de plano una nueva economía.

1. El ojo del huracán del cambio global: la demografía de nuestra especie y la huella per cápita

Los dos factores principales que magnifican la huella humana en el planeta son nuestra demografía y la huella ecológica per cápita. De hecho, el propio crecimiento de la población humana representa uno de los mayores desafíos para el futuro cercano^{1,2}. La población humana nunca ha sido tan abundante ni tan vieja ni tan urbana. El desafío para lograr que este crecimiento poblacional, acoplado a una esperanza de vida mayor, se traduzca en bienestar y a la par en sostenibilidad ambiental es mayúsculo. Mientras los indicadores puramente humanos revelan que nunca antes nuestra especie vivió tanto, ni tuvo los grados de alfabetización ni desarrollo tecnológico que disfrutamos en la actualidad, los indicadores planetarios revelan que nunca antes una única especie ejerció tanta presión en el funcionamiento del ecosistema planetario como la que ejercemos ahora los humanos.

La región de Iberoamérica, con más de 600 millones de personas, que representa casi el 10% de la población mundial, ha mostrado patrones bien claros y definidos de crecimiento demográfico durante el siglo XX a pesar de su gran diversidad étnica y socioeconómica. En general las mayores tasas de cambio poblacional fueron alcanzadas durante el periodo 1950-1970 (2,7%), luego del cual se observan reducciones importantes en la **tasa de crecimiento** poblacional. Un elemento central en la



Derechos Reservados bajo Creative Commons CC0

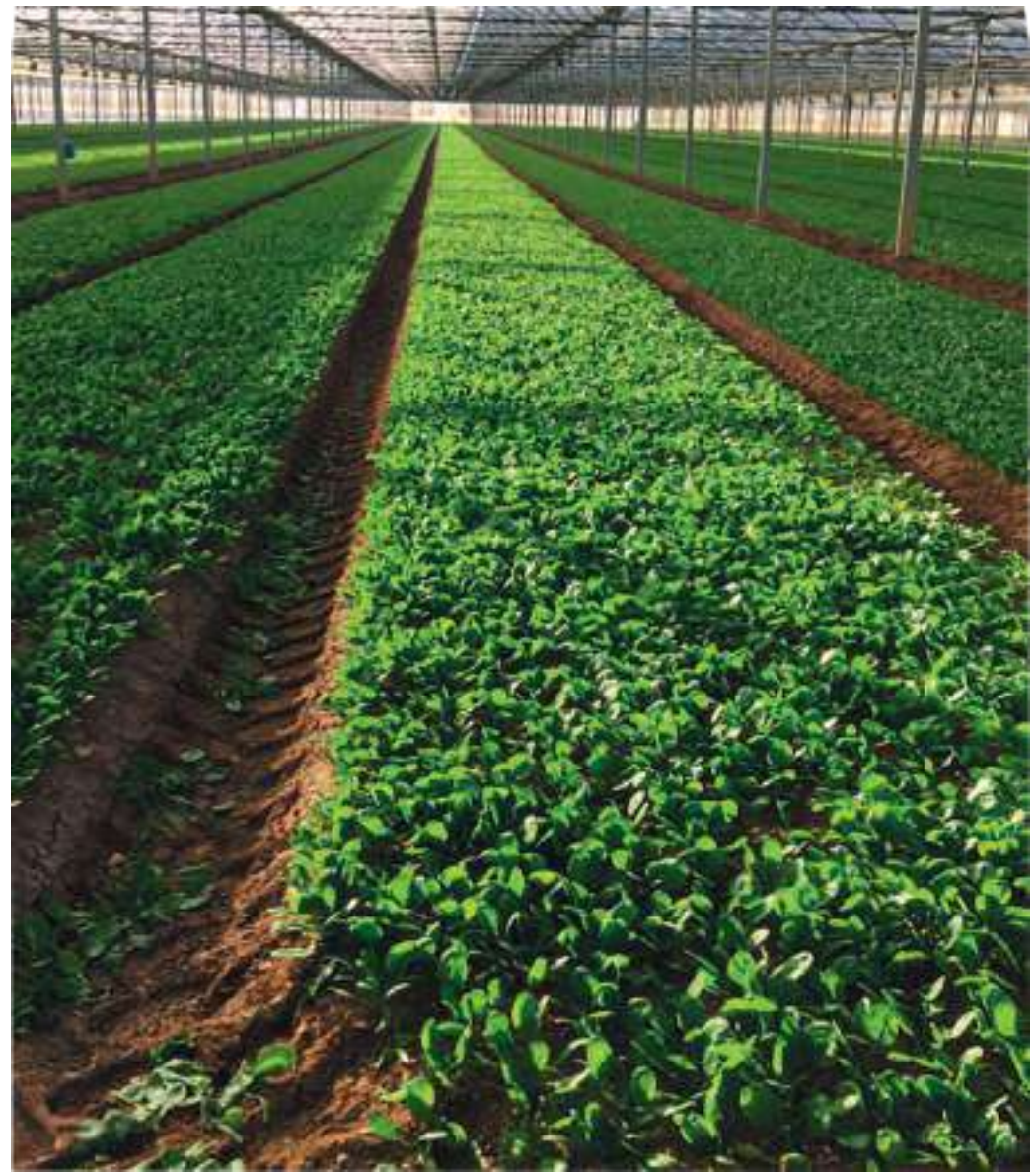
El maíz, un cultivo originario de Iberoamérica, es uno de los alimentos más importantes de la región

evolución temporal de la tasa de crecimiento de la región durante los últimos 100 años, es la tendencia a presentar una relación positiva entre las tasas de crecimiento y el tamaño poblacional durante la primera mitad del siglo XX, para pasar luego a una relación negativa entre las tasas de crecimiento y el tamaño poblacional². La fase acelerada del crecimiento poblacional es la firma demográfica de la revolución industrial disparada hace más de doscientos años en el norte de Europa², mientras que la desaceleración observada durante los últimos 40 años en la región apoya la hipótesis de que la presente reducción en las tasas de crecimiento poblacional humano está afectada por diferentes factores limitantes que operan en combinación a lo largo del planeta.

Iberoamérica cuenta con el 10% de la población mundial

Por otro lado, hay dos procesos demográficos fundamentales que han impactado de maneras muy diferentes sobre una variedad de aspectos relacionados con el cambio global en la región. Uno es el acelerado proceso de urbanización y migración campo-ciudad que experimentó Iberoamérica durante su periodo de expansión demográfica (1900-1970). El otro proceso es la migración entre las diferentes regiones de Iberoamérica experimentada durante las últimas décadas. Ambos procesos de redistribución espacial de la población han impactado de manera profunda en los procesos productivos, en el uso de la tierra, en la biodiversidad e incluso en procesos relacionados con inestabilidades políticas y sociales.

Detener el crecimiento humano reduciría en gran medida el impacto de nuestra especie en el planeta. Esto ha sido bien estudiado para el caso concreto del cambio climático, donde el tener un hijo menos permite reducir el equivalente de la emisión de unas 60 toneladas de CO₂ por habitante y año, con diferencia el gesto de mayor impacto ya que el siguiente (prescindir del coche) permitiría ahorrar tan solo 2,4 toneladas o pasarse a una dieta completamente



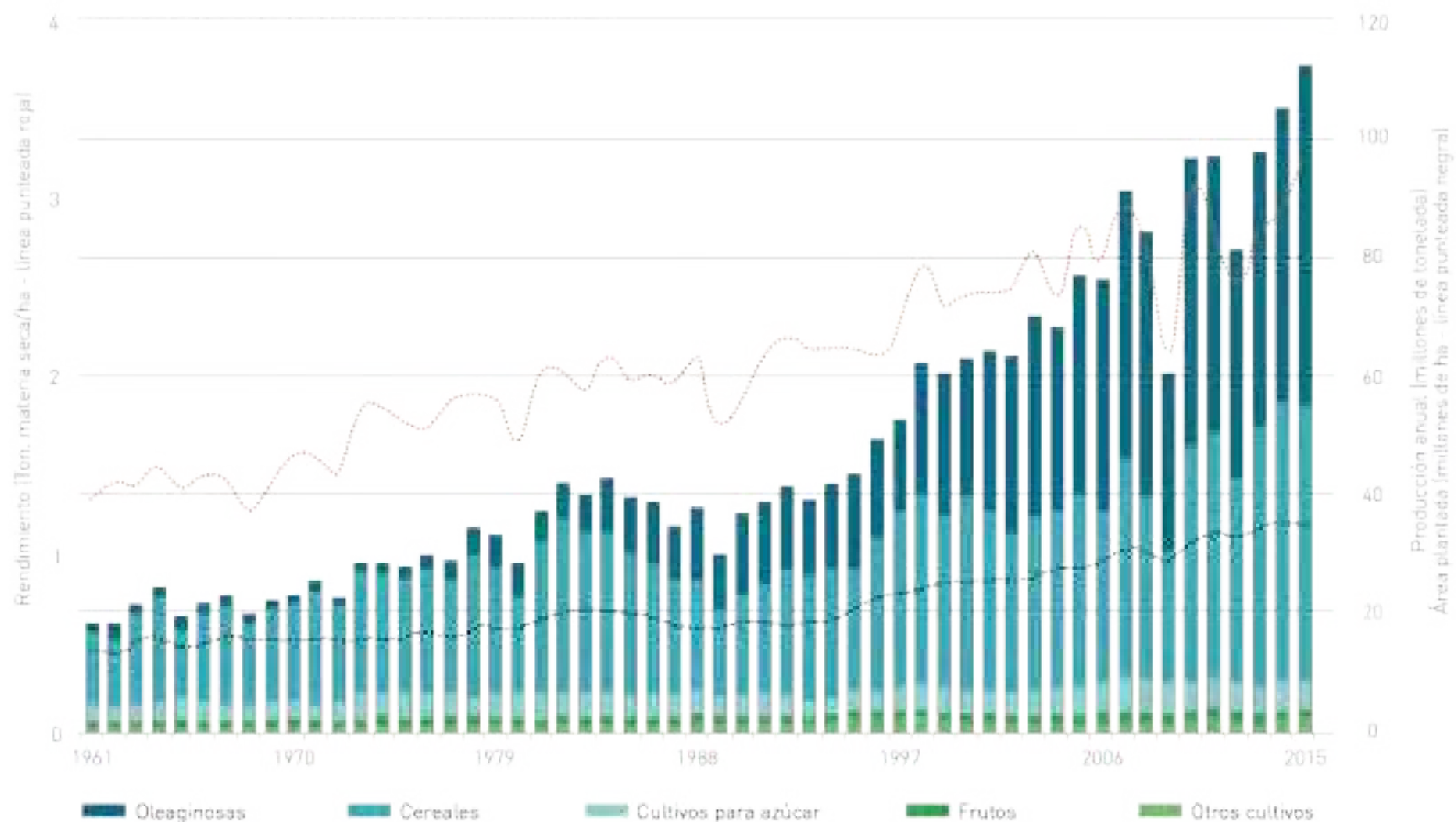
La producción de alimentos necesitará crecer un 60% en las próximas décadas para cubrir las demandas de alimento del siglo XXI. Foto José Luis González

vegetal apenas 0,82³. No obstante, un cambio demográfico de esta naturaleza (tener un hijo menos) es algo que llevaría mucho tiempo de poner en práctica, posiblemente varias generaciones, y mientras tanto hay cosas más rápidas y eficaces que podríamos ir ensayando, todas ellas relacionadas con minimizar la huella ambiental de todos y cada uno de nosotros³.

2. Recursos naturales

Los recursos naturales son aquellos bienes naturales y servicios que contribuyen al bienestar de la sociedad humana. Dentro de los recursos naturales se encuentran los recursos bióticos que se clasifican en agropecuarios, marinos y forestales que serán el principal objeto de este capítulo. La especie humana tiene el increíble record

PRODUCCIÓN AGRÍCOLA ARGENTINA



Evolución de la producción de cereales en Argentina, uno de los principales productores mundiales (modificado de Díaz de Astarloa & Pengue, 2018⁵)

de ser la única capaz de consumir aproximadamente la cuarta parte de toda la productividad neta anual del planeta. Iberoamérica contiene una gran parte de las reservas mineras a nivel global, a la que se suma el principal porcentaje de la diversidad biológica, el 12% de la superficie cultivable, la quinta parte de los bosques y un tercio de las reservas de agua dulce de todo el planeta.

2.1 Recursos agropecuarios

Uno de los mayores retos de la humanidad para el siglo XXI es cubrir la demanda de alimento ante una población mundial en crecimiento con recursos limitados y amenazada por el cambio climático (véase Capítulo 4). Para lograr este desafío la producción mundial de alimentos debe aumentar un 60% para el 2050 según la FAO⁴. Se

estima que, la producción anual de cereales necesita crecer cerca de tres mil millones de toneladas y la de carne debe aumentar 200 millones de toneladas. Este aumento en la producción de alimentos puede lograrse fomentando el rendimiento de los cultivos que en gran medida depende del agua disponible y/o aumentando la cantidad de tierra cultivable. Es aquí donde, con casi un tercio de la tierra y del agua dulce del planeta, Iberoamérica puede ser un elemento clave para resolver el reto de alimentar a una población mundial en crecimiento.

Con casi un tercio de la tierra y del agua dulce del planeta, Iberoamérica puede ser un elemento clave para resolver el reto de alimentar a una población mundial en crecimiento

2.2 Recursos agrícolas

La agricultura es una fuente directa de alimentos, fibra y **biocombustibles**. Iberoamérica es hoy un polo de producción agraria en crecimiento y expansión. En las últimas dos décadas, la región ha aumentado significativamente su participación en la producción mundial de alimentos, contribuyendo con el 11%. La región es en general un exportador neto de alimentos representando cerca del 10% de su PIB (Producto Interno Bruto) y cuenta con el 40% de las reservas genéticas mundiales de plantas y animales.

Iberoamérica se caracteriza por un amplio rango de longitudes y altitudes, así como una gran diversidad de ecosistemas y climas, permitiendo una impresionante diversificación de productos agrícolas. Argentina, Brasil y Uruguay se han especializado en la producción de cultivos anuales (granos y oleaginosas), triplicando en la última década el área plantada para soja y desplazando las tradicionales áreas de pastoreo de ganado vacuno. La región central y andina han aumentado los cultivos perenne como frutas, café, banana y palma; y los cultivos han aumentado progresivamente, especialmente el algodón, soja, maíz y canola.

La región es hoy un polo de producción agrícola en crecimiento y expansión.

Los cereales, un alimento básico en la alimentación humana, han aumentado su producción considerablemente en los últimos treinta años –principalmente debido a la mejora del rendimiento– y se prevé que continúe aumentando aunque a un ritmo menor. Iberoamérica genera aproximadamente un 7% de la producción global de cereales, donde Brasil, Argentina y México están entre los principales productores mundiales. Otros productos como las frutas y los vegetales han experimentado un fuerte crecimiento; el área dedicada a la producción de fruta se ha extendido más rápidamente que para cualquier otra categoría de cultivo durante los últimos años.

La producción de cultivos oleaginosos, principalmente de soja y girasol, ha experimentado un incremento de aproximadamente el 6% anual desde 1961 y se prevé que este rápido crecimiento se mantendrá.

La expansión del área agrícola en Iberoamérica ha sido constante en los últimos años, principalmente orientada hacia cultivos oleaginosos, cuyo crecimiento se estima en el 1,2% en la próxima década⁶. Dicho crecimiento será debido al incremento de la productividad pero también a la presión sobre los recursos naturales, especialmente en la conversión de recursos forestales a tierra de cultivos. En especial, el cultivo de la soja ha aumentado su importancia en la región en el área Amazónica brasileña pero también en la región del Chaco Argentino y Boliviano (ver Capítulo 3).

2.3 Ganadería

La ganadería tiene una función clave en Iberoamérica y contribuye con el 46% del PIB Agropecuario, y ha crecido a una tasa anual de 3,7%, superior a la tasa promedio de crecimiento mundial⁷. La región genera el 13% de la producción global de carne (23% de carne vacuna y de búfalo y 21,4% de carne de aves de corral), y más del 10% de la producción de huevos y leche mundial. El rápido crecimiento del sector pecuario ha venido acompañado de impactos negativos sobre el ambiente y los recursos naturales⁸, como es el caso del sobrepastoreo y la deforestación como consecuencia de la expansión de los pastizales.

El sector pecuario contribuye con el 46% del Producto Interno Bruto agropecuario de Iberoamérica

2.4 Recursos forestales

Iberoamérica es una región con abundantes recursos forestales con casi el 49% de su superficie total cubierta por bosques. Con una estimación de 891 millones



La ganadería es una importante fuente de riquezas en Iberoamérica, pero está generando grandes problemas ambientales
Derechos Reservados bajo Creative Commons CC0

de hectáreas, representa en torno al 22% del área de bosque existente en el mundo⁹. En esta región se encuentra la Amazonía que es el bosque tropical más extenso del mundo con más de siete millones km² repartidos entre nueve países. Es bien conocida su importancia para el clima local y mundial puesto que intercambia grandes cantidades de agua y energía con la atmósfera¹⁰.

La extensión de los bosques se ha ido reduciendo a lo largo de las últimas décadas como consecuencia de la deforestación debida principalmente a la expansión de la ganadería y la agricultura. Entre 2005 y 2010 Iberoamérica ha perdido 38.300 km² de bosques por año (69% de la deforestación mundial)¹¹. Siendo Brasil el país con la mayor deforestación en el mundo. En la Amazonía se llega a destruir hasta 970 km² mensualmente. Uno de cada dos árboles talados en el mundo está en la Amazonía.

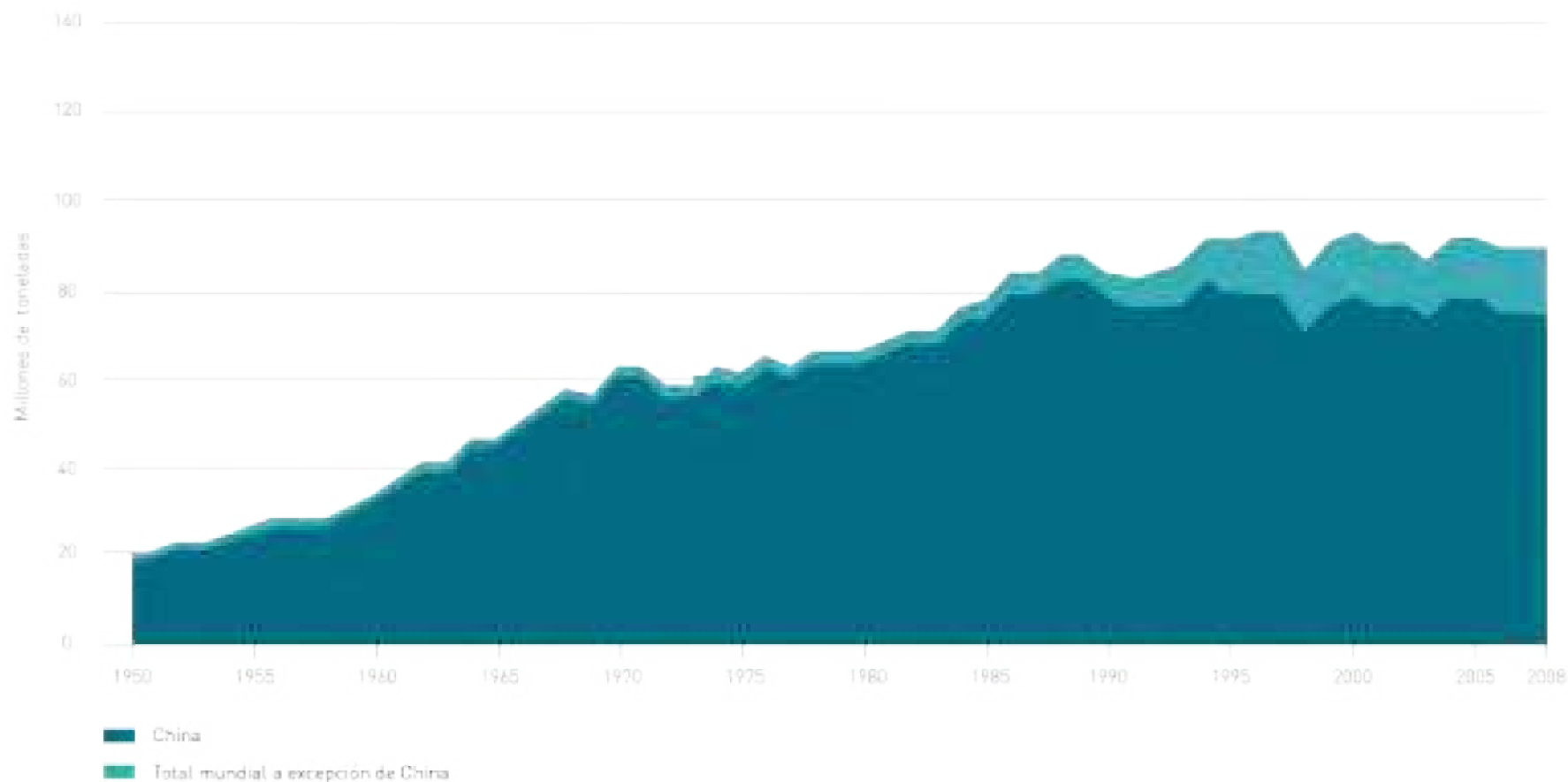
Uno de cada dos árboles talados en el mundo está en la selva amazónica

Los bosques desempeñan un papel vital en la mitigación y adaptación al cambio climático. Los árboles y los bosques ayudan a mitigar estos cambios al absorber el dióxido de carbono de la atmósfera y convertirlo, a través de la fotosíntesis, en carbono que “almacenan” en forma de madera y vegetación, lo que supone en alrededor del 20 por ciento de su peso. En este sentido, Iberoamérica tiene un papel destacado, ya que su gran extensión de bosques pueden ayudar a capturar grandes cantidades de

El área forestal de Iberoamérica representa el 22% de los bosques del mundo. Bosque en Chiloé. Foto Pablo A. Marquet



PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LA PESCA DE CAPTURA



carbono, por ejemplo, se estima que la Amazonía absorbe cerca del 10% de las emisiones globales de dióxido de carbono de combustibles fósiles y contiene entre 90 y 140 mil millones de toneladas métricas de carbono.

2.5 Recursos Pesqueros

La producción de peces e invertebrados del mar, ya sea que provengan de la pesquería de especies silvestres o desde la acuicultura de algunas especies en zonas costeras, es una de las fuentes primarias de proteína y nutrientes esenciales para la humanidad en todo el mundo. Actualmente, los productos alimenticios del mar proveen el 20% de la ingesta de proteína animal a más de tres mil millones de personas pero en algunos países esta fuente de proteína puede representar más del 50%¹². Aparte de su valor histórico y cultural, y de su rol en la seguridad alimentaria de la población mundial, los peces y demás productos del mar son

crecientemente apreciados por su valor nutritivo y sus beneficios para la salud. En parte porque los peces son uno de los sistemas más eficientes en generación de proteína y ácidos grasos, y en parte por los beneficios para la salud. La acuicultura en aguas costeras y borde costero ha aumentado muy significativamente desde fines de los años 90. En el año 2012 se produjeron 158 millones de toneladas de peces y otros organismos marinos en todo el mundo, de las cuales 91 millones correspondieron a pesquería de especies silvestres, primariamente pesquerías industriales, y 67 millones a especies marinas cultivadas¹². Así, en 40 años la provisión de alimentos del mar a la población humana se ha triplicado, desde 6 a 19,2 kg por persona al año. Por diversas razones, desde 1950 la demanda de peces ha ido aumentando a razón de 2,5% por año, tanto en países desarrollados como en países en vías de desarrollo y se espera que esta demanda continúe aumentando acompañado del desarrollo de China e India.



Las pesquerías Iberoamericanas muestran signos de sobreexplotación y en algunos casos colapso. Caleta de Tongoy, Chile. Foto Pablo A. Marquet

A nivel mundial, la demanda por peces y productos del mar ha aumentado desde 1950 a razón de 2,5% por año

En Iberoamérica, la explotación de especies de invertebrados y algas, y en menor grado también peces desde el borde costero, se remonta a las primeras culturas que se establecieron en la América prehispánica hace alrededor de 14 mil años atrás. Algunas de estas culturas precolombinas, como la cultura Chinchorro en las costas del desierto de Atacama, la cultura Llo-Lleo en la zona central de Chile estableció una fuerte dependencia de los recursos del mar y han dejado un registro impresionante de conchales en el borde costero¹³. Sin embargo, con pocas excepciones, estas pesquerías de subsistencia estaban muy lejos de producir cambios importantes en las poblaciones naturales, especialmente en las productivas aguas del Pacífico. Ciertamente, el impacto de la explotación pesquera, que actualmente ha llegado al

punto de amenazar la sustentabilidad de la mayoría de las pesquerías, se produce luego de la industrialización de las artes y embarcaciones de pesca y, especialmente, luego de la globalización de los mercados mundiales.

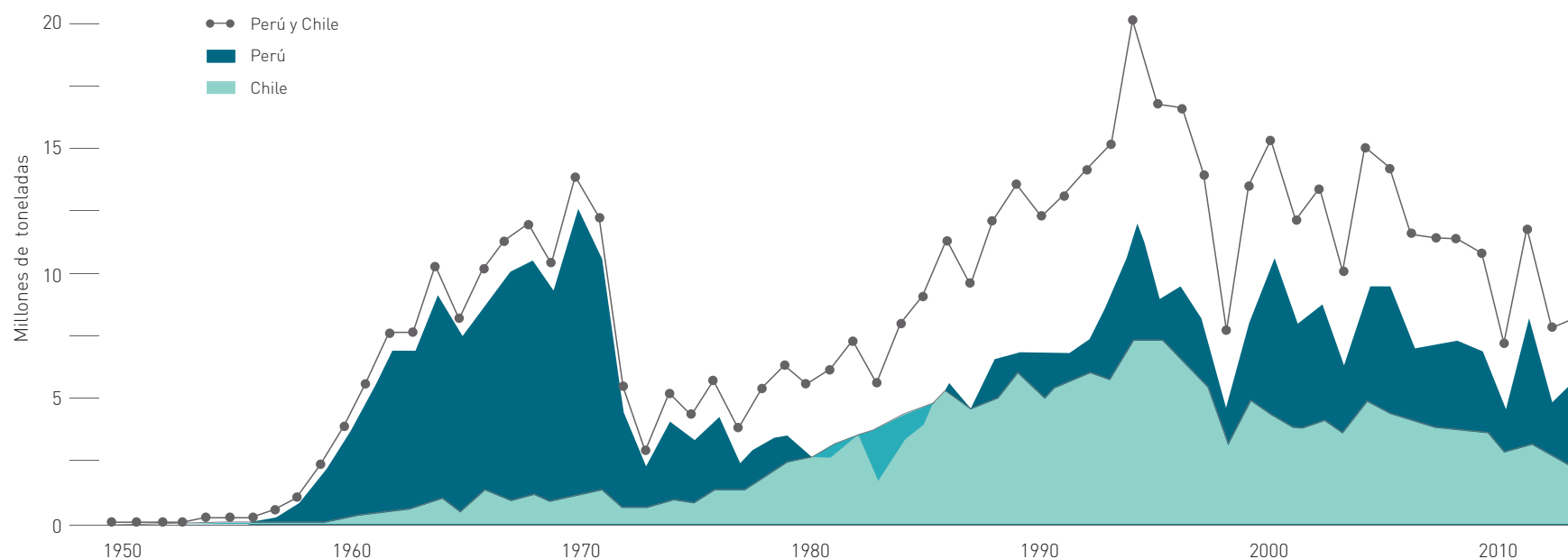
Las pesquerías en Iberoamérica han sido entonces muy importantes social, cultural y económicamente desde tiempos prehistóricos y lo continúan siendo hoy en día (ver Capítulo 11). La actividad de acuicultura de especies tanto en aguas costeras como en el borde costero, como el cultivo de camarones en zonas de manglares en Ecuador, es una actividad mucho más reciente, pero que ha crecido de manera muy acelerada tanto en volumen o biomasa producida, como en retornos económicos en la región. Para poder analizar el estado de las pesquerías y sus consecuencias sobre la sociedad y los países, se debe distinguir, entre las “pesquerías costeras o artesanales” y las “pesquerías industriales”, las que generalmente están obligadas a operar por fuera de la zona costera, pero en el interior de las zonas económicas exclusivas de los países.





Pescadería en España. Foto Pablo A. Marquet

DESEMBARQUE PESQUERO



Decaimiento de los desembarques industriales de Chile y Perú

Las pesquerías en Iberoamérica han sido importantes social, cultural y económicamente desde tiempos prehistóricos y lo continúan siendo hoy en día

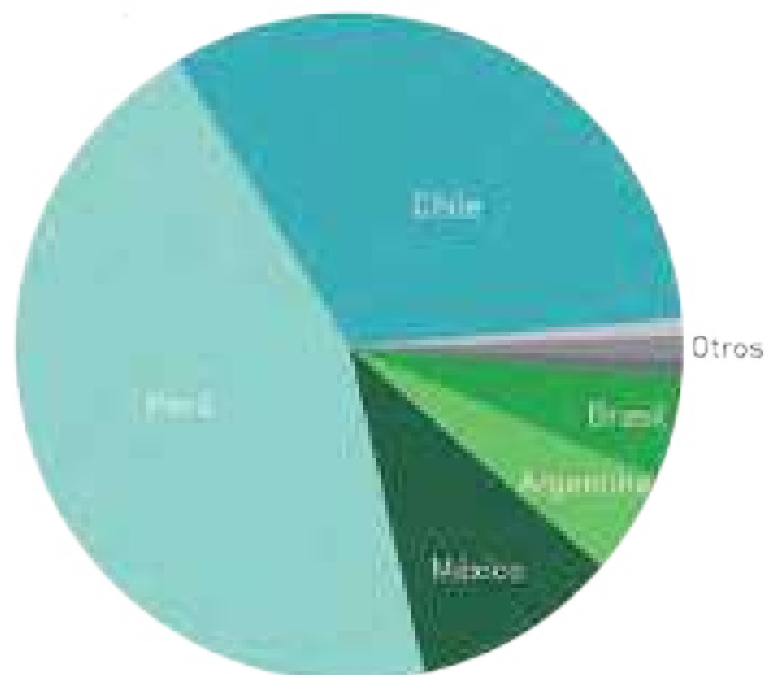
2.5.1 Pesquerías Industriales

Los datos de los desembarques totales mundiales crecieron sostenidamente desde los años 50, como resultado del aumento en la industrialización de la pesca, para alcanzar un máximo alrededor de las 80 a 90 millones de toneladas a mediados de los años 80. Desde entonces, los desembarques mundiales han declinado en forma más o menos sostenida, con algunas fluctuaciones atribuibles a variabilidad climática como el fenómeno El Niño y a la incorporación de nuevas especies recurso, como el calamar gigante. La gran mayoría de los desembarques mundiales totales corresponde a pesquerías pelágicas del tipo industrial, las que se desarrollan primariamente en el océano costero, al interior de las zonas económicas exclusivas de los países. La mayor parte de esta biomasa no la consumimos en la forma de peces o mariscos, sino que es transformada en harina y pellets y la consumimos

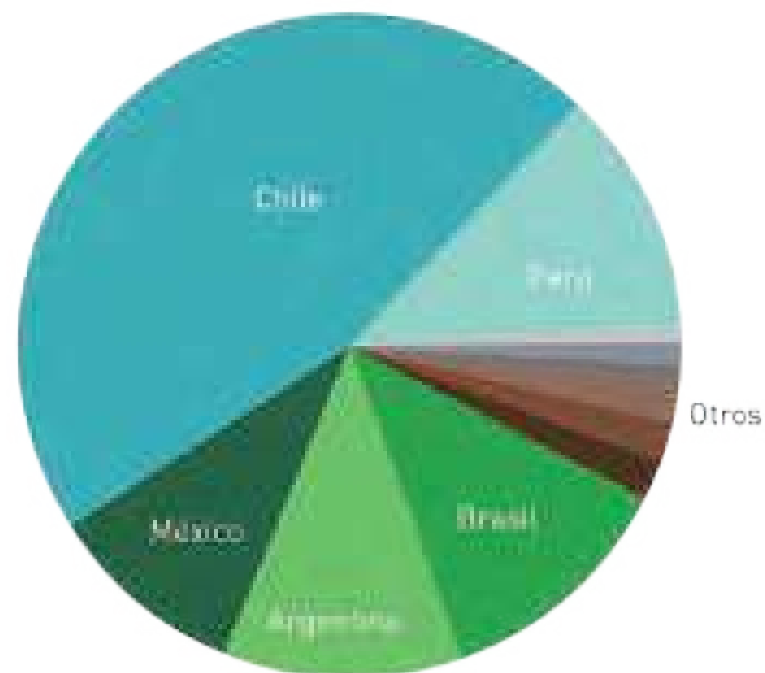
en la forma de pollos, cerdos o salmones cultivados, o en productos derivados y la usamos en los helados, conservas, medicamentos y cosméticos.

En Iberoamérica, los principales desembarques pesqueros corresponden también a pesquerías pelágicas industriales, pero con una contribución muy desigual entre los países. Las pesquerías de Perú y Chile, que se desarrollan en las frías y productivas aguas del ecosistema de la corriente de Humboldt (ver Capítulo 7) representan sobre el 80% de las pesquerías de toda Iberoamérica¹⁴. En el contexto mundial, las pesquerías de estos dos países son tan importantes que llegaron a representar sobre el 40% de los desembarques mundiales. Por ello, sus fluctuaciones repercuten en la extracción de proteína que se obtiene del mar a nivel mundial. Las principales especies que conforman las pesquerías de estos países son capturadas a través de la pesca de cerco, como la Anchoveta, la mayor pesquería de una especie en todo el mundo, la Sardina, la Merluza común, la Sardina Española, o el Jurel. En otros países iberoamericanos con pesquerías industriales bien desarrolladas, como Brasil y Argentina, la mayor parte de los desembarques provienen de pesquerías de arrastre de media agua y de arrastre de fondo.

DESEMBARQUES TOTALES



DESEMBARQUES PESQUERÍAS COSTERAS



Las pesquerías industriales de Chile y Perú representan entre el 20% y 40% de los desembarques mundiales

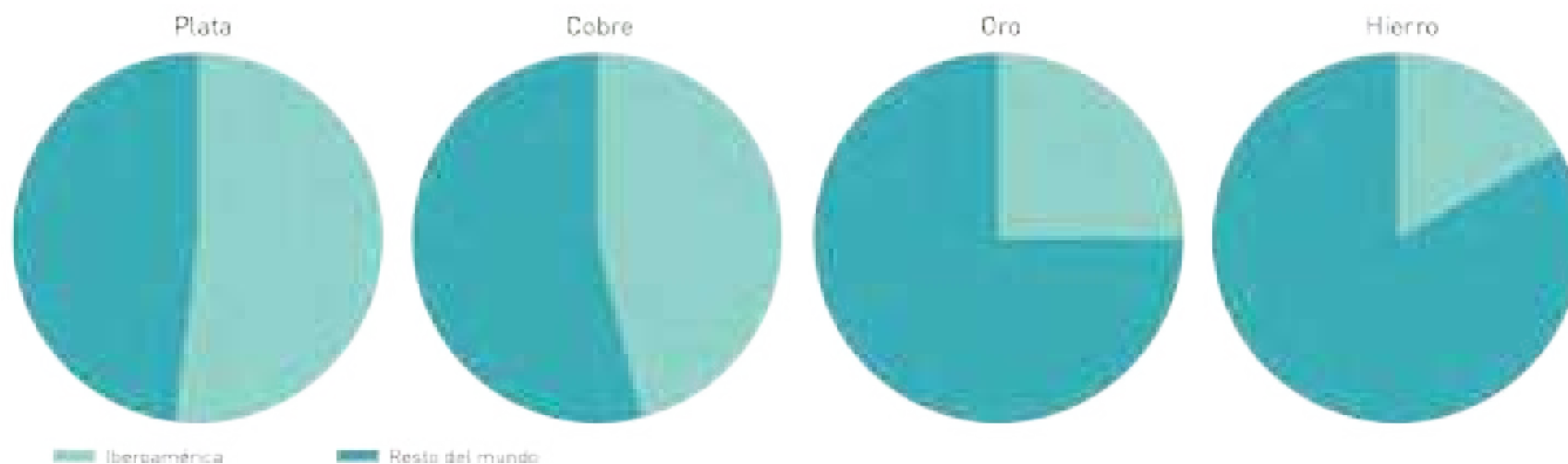
El estado actual de las pesquerías industriales en Iberoamérica no es alentador. Como ocurre con la mayoría de las pesquerías industriales de todo el mundo¹⁵. Las grandes pesquerías Iberoamericanas muestran claros signos de sobre-explotación y, en algunos casos de colapso, como ocurre con la pesquería de la Merluza en Chile. La tendencia mundial de decaimiento de los desembarques totales es aún más acentuada en los desembarques industriales de Chile y Perú.

Desde un máximo de 20 millones de toneladas a principios de los años 90, los desembarques de estos dos países han decaído en 20 años a menos de 10 millones de toneladas. A pesar de ello, las pesquerías de estos países continúan siendo por mucho las principales pesquerías en Iberoamérica, por lo que el estado de éstas refleja bien la situación de los desembarques totales en esta parte del mundo. En su último informe respecto del estado de las principales pesquerías chilenas, la subsecretaría de pesca señala¹⁶ que el análisis de puntos biológicos

de referencia de los 26 stocks que forman parte de las pesquerías industriales del país, muestra que la mayoría de ellas se encuentra ya sea “sobreexplotadas” como por ejemplo la Merluza común, la Merluza del Sur y la Merluza de tres aletas, o “agotadas” como es el caso del Bacalao de profundidad y la Sardina española.

2.5.2 Pesquerías Artesanales

Aunque en el contexto global las pesquerías costeras o artesanales representan una fracción menor de los desembarques totales de biomasa de peces, en muchas regiones del mundo estas pesquerías artesanales son de una enorme importancia social, cultural y económica para los países (véase Capítulo 11). Este es el caso en Iberoamérica en donde, en la mayoría de los países, existe una actividad pesquera de tipo costera artesanal muy desarrollada. En términos globales, varios atributos muy importantes distinguen a estas pesquerías de las pesquerías industriales y las hacen potencialmente más sustentables. Por ejemplo, mientras que se estima que la pesquería industrial emplea medio millón de personas, las pesquerías artesanales involucran a más de 12 millones de personas. Más de la mitad de la biomasa de peces para



Participación de Iberoamérica en la producción global (2013, en toneladas). Fuente, United States Geological Survey

consumo humano directo es extraída por la pesquería artesanal y prácticamente nada se utiliza en reducción industrial. Mientras la pesquería industrial utiliza entre 14 y 19 millones de toneladas de combustible al año, la pesquería artesanal utiliza entre 1 y 3 millones de toneladas. Además, se estima que la pesquería industrial descarta en el mar (pesca incidental) alrededor de 10 a 20 millones de toneladas, mientras en la pesquería artesanal existe comparativamente muy poco descarte de especies incidentales. Pero estos atributos globales no implican que las pesquerías artesanales estén en buenas condiciones y seas todas sustentables. Por el contrario, muchas de éstas también han colapsado o están sobreexplotadas y a veces han producido grandes e irreversibles impactos ambientales. Tal vez los problemas más grandes de las pesquerías artesanales son la falta de información crítica para realizar manejo pesquero y la incapacidad de la mayoría de los estados de imponer regulaciones en sus territorios.

La mayoría de los países de Iberoamérica tienen una actividad pesquera artesanal muy bien desarrollada y con mucho acervo cultural. Mientras que a nivel industrial Perú, Chile, España y Portugal se llevan la mayor parte de toda la biomasa extraída, a nivel de pesquerías artesanales la repartición de los desembarques es más equitativa. Luego de Perú y Chile, también lideran la región en desembarques México, Argentina y Brasil con una producción similar y muy significativa, por sobre las 130 mil toneladas de biomasa al año. Los desembarques de la pesquería artesanal en Colombia, Uruguay y Cuba superan las 15 mil toneladas anuales, mientras que en el resto de

los países de Latinoamérica no superan las 8 mil toneladas anuales. Ahora bien, la fracción del total de biomasa de organismos marinos que es extraída por la pesquería artesanal con respecto al total de sus desembarques (artesanal más industrial) varía enormemente entre los países. Aquellos países que exhiben la mayor extracción de biomasa por parte de la pesquería artesanal tienen a la vez aún mayor extracción de recursos marinos por parte de la pesquería industrial.

3. Otros recursos naturales

Iberoamérica es rica en una gran variedad de recursos naturales no biológicos, especialmente en aquellos procedentes de explotaciones mineras. La producción minera incluye prácticamente todos los metales y minerales producidos en el mundo¹⁷.

La producción minera incluye prácticamente todos los metales y minerales producidos en el mundo

Por citar algunos números, Iberoamérica almacena el 65% del litio, el 49% de la plata, el 44% del cobre, el 33% del estaño, el 21% del hierro y más de la quinta parte de los combustibles fósiles del planeta. Cuatro países estaban en 2009 entre los cinco productores mundiales de los siguientes minerales: Perú era el primer productor de plata, el segundo de zinc, el tercero de cobre y estaño, el cuarto

de molibdeno y plomo, y el quinto de oro. Chile era el primer productor de cobre, litio, y yodo, el segundo de selenio, el tercero de molibdeno, y el quinto productor de plata. Brasil era el primer productor de niobio, el segundo de mineral de hierro, el tercero de bauxita y el quinto de estaño. Bolivia era el tercer productor de antimonio y el cuarto de estaño.

Se estima que el potencial minero es aún mayor ya que la información geológica disponible para esta inmensa región es incompleta¹⁸. El análisis en su conjunto revela una dinámica exponencial en la explotación de estos recursos debido al incremento en la actividad minera y en la eficiencia tecnológica de las explotaciones. Es muy preocupante que en gran parte de la cuenca Amazónica, en su área andina, existan enormes yacimientos ya asignados de petróleo y minería (dos tercios de la Amazonía peruana y ecuatoriana) muchos de los cuales se sobreponen con Áreas Protegidas y atraeran obras de infraestructura, como caminos, gaseoductos y represas provocando un enjambre de cambios en los ecosistemas de agua dulce de la Amazonía¹⁹. Es necesario tener en cuenta que los efectos ambientales que provoca la explotación minera a gran escala no perturban solamente el medio ambiente natural, sino que inciden en las comunidades y personas que se encuentran en esas zonas. El desafío es la gestión y la gobernanza de estos recursos no renovables que permitan una transición a un modelo socio-económico realmente sostenible.

4. El futuro

Lo expuesto en este capítulo nos permite reflexionar sobre el futuro de la empresa humana sobre el planeta, considerando que, como otra especie más, somos dependientes de los servicios que ésta nos provee. Estos servicios se conocen con el nombre de **Servicios Ecosistémicos** (SSEE) y como concepto fue acuñado en el década de los ochenta²⁰ y sentó las bases de lo que fuera la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio²¹, que contó con la participación de cientos de científicos y proveyó un diagnóstico de la extensión en que los ecosistemas

se han visto alterado por acción humana. Esta alteración, se focalizó respecto de los SSEE que estos proveen para el hombre. Entre éstos están los de provisión que tienen que ver con lo discutido en este capítulo, la provisión de alimento, fibra, combustible y minerales que son esenciales para la empresa humana pero cuya extracción puede causar, como hemos visto, efectos negativos que puedan afectar nuestra persistencia. Un par de estudios recientes señalan que nuestra biósfera está en un estado de transformación ecológica de tal magnitud que es probable que experimente rápidos cambios, de aquí a medidados de siglo²², si continuamos con las actuales tasas de transformación de los ecosistemas. Parte de la solución, sin embargo, pasa por minimizar los impactos negativos y globales que tiene la actividad industrial asociada al uso de recursos (e.g. servicios de provisión)²³. Pero esto no es simple, pues involucra cambios desde el cómo se comportan los individuos hasta las instituciones, y lo que es más complejo aún, cambios económicos o de plano una nueva economía.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 Cohen, J.E. How Many People Can the Earth Support? W. W. Norton, New York (1995).
- 2 Lima M. & Berryman A.A. Positive and negative feedbacks in human population dynamics: future equilibrium or collapse? *Oikos* 120, 1301-1310 (2011).
- 3 Wynes, S. & Nicholas K.A. The climate mitigation gap: education and government recommendations miss the most effective individual actions. *Environmental Research Letters* 12, 074024 (2017).
- 4 FAO. FAO's Work on Climate Change. Roma Italia. (disponible en <http://www.fao.org/3/a-i6273e.pdf>) (2016).
- 5 Díaz de Astarloa, D.A. & Pengue W. A. Nutrients Metabolism of Agricultural Production in Argentina: NPK Input and Output Flows from 1961 to 2015. *Ecological Economics* 147, 74-83 (2018).
- 6 OCDE-FAO. Perspectivas Agrícolas 2015-2024. (2015) Sitio Web de la FAO (disponible en <http://www.fao.org/3/a-i4738s.pdf>).
- 7 FAO. La ganadería y sus desafíos en América Latina y el Caribe (2014). Sitio Web de la FAO (disponible en <http://www.fao.org/agronoticias/agro-editorial/detalle/en/c/237808/>).
- 8 FAO. El estado mundial de la agricultura y la alimentación: La ganadería a examen (2009). Sitio Web de la FAO (disponible en <https://www.fao.org.br/download/i0680s.pdf>).
- 9 FAO Situación de los bosques del mundo. Sitio web de la FAO (2011). (disponible en <http://www.fao.org/docrep/013/i2000s/i2000s.pdf>).

- 10 Vourlitis, G. L. *et al.* Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil. *Water Resources Research*, Vol. 38 10.1029/2000WR000122 (2002).
- 11 FAO. Global Forest Resources Assessment 2010. FAO Forestry Paper No. 163, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy (2010).
- 12 HLPE. Sustainable fisheries and aquaculture for food security and nutrition. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome (2014).
- 13 Rivadeneira, M. M., Santoro, C. M., & Marquet, P. A. Reconstructing the history of human impacts on coastal biodiversity in Chile: constraints and opportunities. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 20, 74-82 (2010).
- 14 FAO. Estado mundial de la pesca y acuicultura. Sitio Web de la FAO (2016). (disponible en <http://www.fao.org/3/a-i3720s.pdf>).
- 15 Myers, R., Worm, B. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature* 423, 280-283 (2003).
- 16 Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. Estado de situación de las principales pesquerías chilenas, año 2017, (2018).
- 17 U.S. Geological Survey. Minerals Yearbook, volume III, Area Reports—International—Latin America and Canada (2018).
- 18 Johnson, K. M., Hammarstrom, J. M., Zientek, M.L. & Dicken, C.L. Estimate of undiscovered copper resources of the world, 2013: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2014-3004 (2014).
- 19 Castello, L. & Macedo, M. N. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Global Change Biology* 22, 990-1007 (2016).
- 20 Ehrlich, P. & Ehrlich A. *Extinction: the Causes and Consequences of the Disappearance of Species*. Random House, New York (1981).
- 21 Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC (2005) (disponible en: millenniumassessment.org).
- 22 Barnosky, A. D., Hadly, E. A., Bascompte, J. *et al.* Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature* 486, 52-58 (2012).
- 23 Weinberger, V. P., Quiñinao, C., & Marquet, P. A. Innovation and the growth of human population. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 372, 20160415 (2017).

REFERENCIAS COMENTADAS

Myers, R., Worm, B. Rapid worldwide depletion of predatory fish communities. *Nature* 423, 280-283 (2003).

El primer estudio que evalúa los efectos ecológicos de la pesquería industrial a escala global. Para esto construye las variaciones históricas de la biomasa comunitaria asociada a peces depredadores de gran tamaño en nueve sistemas oceánicos y zonas de la plataforma continental. El estudio reporta que la pesca industrial ha reducido en un 85% la biomasa comunitaria de las áreas explotadas en un período de 15 años y que la biomasa actual de peces depredadores de gran tamaño representa alrededor del 10% que lo que hubo durante la época pre-industrial. Los autores concluyen que estos cambios tienen profundas consecuencias para los ecosistemas.

Rivadeneira, M. M., Santoro, C. M., & Marquet, P. A. Reconstructing the history of human impacts on coastal biodiversity in Chile: constraints and opportunities. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 20, 74-82 (2010).

Este estudio revisa la evidencia arqueológica (desde los 11,000 años antes del presente) y actual respecto de la explotación por parte del hombre, de los ecosistemas marinos litorales de Chile. Estos impactos son comparados con lo que se conoce de las comunidades de organismos costeros antes de la llegada del hombre. El estudio concluye que, aunque la explotación prehistórica fue intensa, no alcanzó una magnitud que pudiera haber causado un impacto profundo en los ecosistemas costeros a diferencia de lo que observamos a partir del último siglo.

Castello, L. & Macedo, M. N. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Global Change Biology* 22, 990-1007 (2016).

Este estudio, centrado en los ecosistemas de agua dulce del Amazonas, recopila y analiza la información disponible con el fin de evaluar los impactos actuales y potenciales sobre la conectividad hidrológica de estos ecosistemas. El estudio identifica 154 represas de gran tamaño y 21 bajo construcción proyectos impulsados por la empresa minera y la explotación petrolera. Más aún, se predice que, de continuar la tendencia en la construcción de represas, en las próximas décadas solo tres tributarios del Amazonas estarán libres de represas. Este estudio pone énfasis en las complejas interacciones que el represamiento de los ríos y la actividad minera generan y como éstas al final del día afectan negativamente el bienestar humano.

Weinberger, V. P., Quiñinao, C., & Marquet, P. A. Innovation and the growth of human population. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 372, 20160415 (2017).

Este representa un estudio teórico del impacto del crecimiento de la población humana sobre la provisión de servicios ecosistémicos. Considera que el uso y continuo mejoramiento tecnológico del flujo de servicios ecosistémicos, al tener potencialmente impactos negativos sobre la provisión de los mismos, es capaz de generar dinámicas de crecimiento humano no sostenibles y propensas al colapso. Un escenario en que los impactos negativos del uso de los servicios ecosistémicos son revertido podría asegurar un crecimiento sustentable.

GLOSARIO

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. Es conocida por sus siglas en inglés FAO (Food and Agriculture Organization).

Biocombustible. Es una mezcla de sustancias de origen biológico que se utiliza como combustible en los motores de combustión interna. Estos restos orgánicos proceden habitualmente del azúcar, trigo, maíz o semillas oleaginosas.

PIB (Producto Interno Bruto). Es el cálculo de toda actividad económica de un país (o una región) durante un período determinado de tiempo (normalmente un año).

Tasa de crecimiento poblacional. Es la tasa que expresa el crecimiento o decrecimiento de la población de un determinado territorio durante un período definido, expresado generalmente como porcentaje de la población al inicio de cada período o año.

Puntos biológicos de referencia. Son valores máximos de la mortalidad por pesca o valores mínimos de la biomasa, que no deben ser superados. En caso contrario, se considera que se pone en peligro la capacidad de autorenovación del stock.

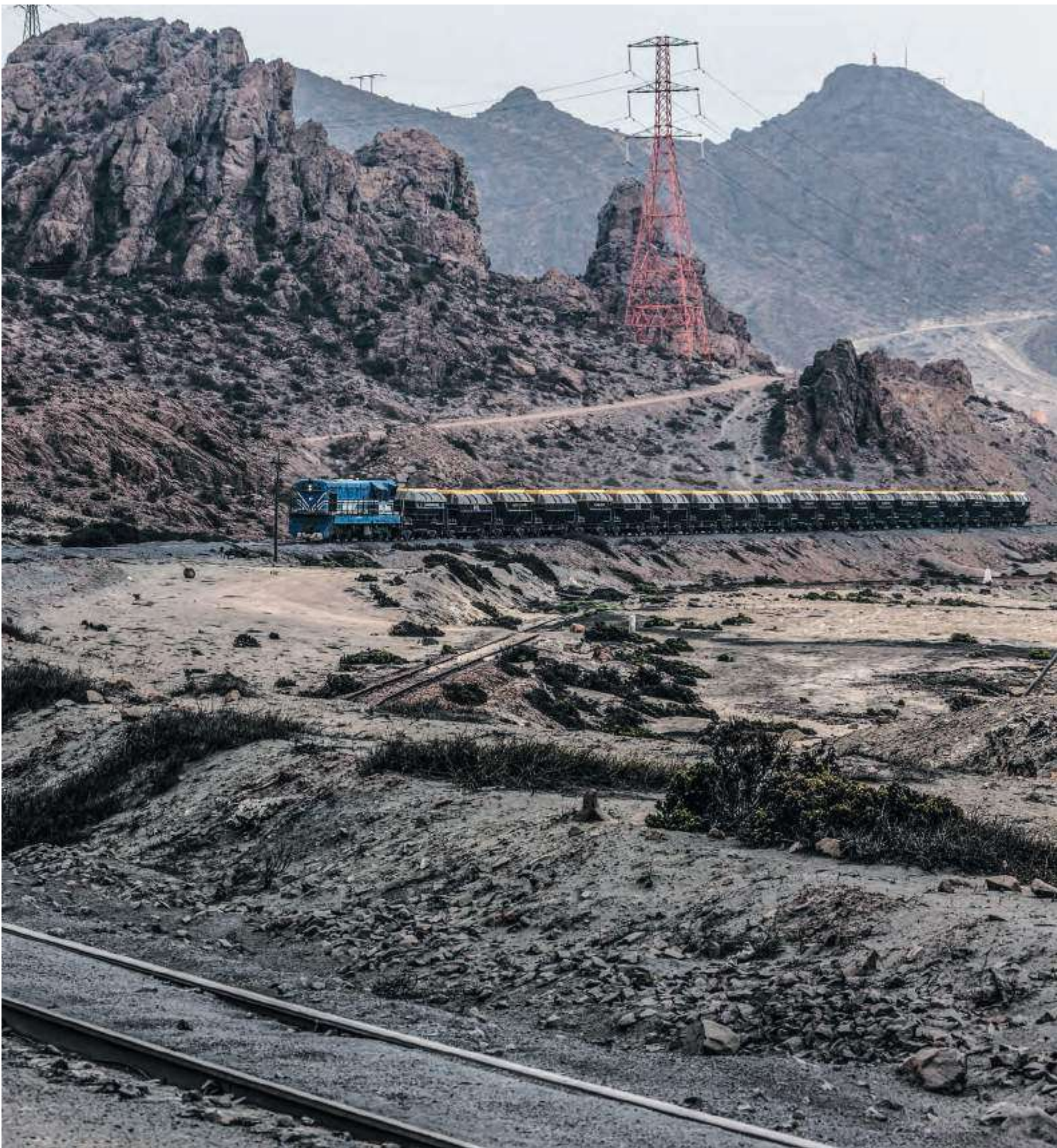
Servicios Ecosistémicos. Corresponden a los servicios que nos proveen los ecosistemas y la biodiversidad en general, y que permiten nuestra existencia. Estos incluyen servicios de soporte como la generación de suelo, de provisión como la producción de alimento, regulación, como ser la regulación del clima y también servicios asociados a la recreación y valor estético cultural de la naturaleza.





Pescador trozando una Albacora en Tocopilla, norte de Chile. Foto Fernando Maldonado

Deforestación del bosque tropical a causa de plantaciones de palma aceitera en Costa Rica (página opuesta arriba), y de plantaciones soja en la Amazonía. Fotos Rhett Butler, Mongabay.com



Cambio Global y redes de intercambio comercial: no todo lo que se mueve es aparente a los ojos

Pablo A. Marquet, Teodoro Dannemann y Aurora Gaxiola

RESUMEN

El ser humano ha alterado sustancialmente la magnitud de los flujos de energía y materia a través de la biósfera. Esto se verifica en la explotación y transformación de los ecosistemas para la generación de alimento y mercancías y en un acelerado uso de combustibles fósiles para poder sostener las actividades económicas y el transporte de mercancías, así como la demanda de las ciudades y sus habitantes. Estas modificaciones están relacionadas con casi todos los motores de cambio global como son el cambio en el uso de la tierra, la pérdida de hábitat y fragmentación, así como la pérdida de biodiversidad, la introducción de especies invasoras o los cambios en los ciclos biogeoquímicos. La alteración en términos de magnitud, cambios de dirección y origen del flujo de elementos químicos y especies en la Tierra a través de las redes de intercambio comercial es un proceso que tiene profundas raíces históricas y cuyos efectos se han incrementado con el alcance global de los mercados. En este capítulo examinamos las consecuencias de las redes de intercambio comercial sobre el movimiento del agua y nutrientes (cómo el nitrógeno y fósforo) embebidos en los elementos que se transan comercialmente en nuestro planeta. En este contexto es urgente visibilizar las implicancias ambientales del comercio internacional así como regular sus impactos.

Ferrocarril transportando mineral de hierro hacia el puerto Guacolda II, al sur del puerto de Huasco, Chile. Foto Fernando Maldonado

El ser humano ha alterado sustancialmente la magnitud de los flujos de energía y materia a través de la biósfera, explotando por un lado combustibles fósiles para poder sostener las actividades económicas y el transporte de mercancías, así como la demanda de las ciudades y sus habitantes; y por otro, a través del uso de la biodiversidad como fuente de materias primas para distintas actividades industriales como las fibras para la industria textil, árboles para la industria de la construcción y papel, o para el consumo directo por parte del hombre a través de la industria agrícola y ganadera.

Estas modificaciones están relacionadas con casi todos los motores de cambio global como son el cambio en el uso de la tierra, la pérdida de hábitat y fragmentación, así como la pérdida de biodiversidad, la introducción de especies invasoras o los cambios en los ciclos biogeoquímicos. Estos últimos cambios, los biogeoquímicos, están asociados a las **funciones ecosistémicas**, tales como la distribución de nutrientes y el agua en la biósfera, y son claves para el bienestar del ser humano y la sustentabilidad de su empresa sobre el planeta^{2,3,4}.

El agua y los nutrientes se mueven en nuestra biosfera a escalas regionales y globales. Por ejemplo, una partícula de nitrógeno situada al norte del Océano Atlántico puede ser transportada hasta el extremo sur por las corrientes marinas (específicamente por la llamada cinta transportadora oceánica) en un tiempo de entre 100 a 200

años. Hoy en día, ese nitrógeno contenido en una fruta o animal, puede dar la vuelta al planeta en dos días.

Gracias a las redes de intercambios comerciales, el flujo de nutrientes a escala planetaria se ha acelerado

La alteración en términos de magnitud, cambios de dirección y origen del flujo de elementos químicos y especies en la Tierra no es un acontecimiento reciente si no que data de tiempos prehistóricos, por lo que su impacto se ha acumulado durante miles de años. Por ejemplo, es bien sabido que sociedades pre-colombinas como la Chimú e Inca entre otras, intercambiaban productos como lana y conchas de moluscos (*Spondylus sp.*) en los Andes centrales y a lo largo de la costa Pacífica, abarcando los territorios que hoy corresponden a Perú, Ecuador, Chile y Argentina⁵⁻⁷. Las conchas de *Spondylus* eran intercambiadas en la Europa Neolítica, hallándose en zonas muy alejadas de las costas, sugiriendo así una vasta red de intercambio, probablemente la red de intercambio a gran escala más antigua que se conozca⁸⁻⁹. Asimismo, este intercambio significaba, a una escala pequeña, movimiento de los compuestos químicos que forman parte de la concha de éste molusco, a saber carbonato de calcio y por lo tanto una pequeña alteración del ciclo del carbono y calcio. No obstante, estos flujos se han amplificado a lo largo de la historia y en particular desde la revolución industrial.

Un claro ejemplo de las fuertes consecuencias y cambios que pueden acarrear las redes de intercambio se asocia a la colonización española y portuguesa en Sudamérica, que es una consecuencia directa de la búsqueda de nuevas rutas y productos de intercambio. Los colonos llevaron a América varias especies europeas para su alimentación, como ovejas, vacas, caballos, aceitunas, trigo y los cítricos que provenían de Asia. A su vez, llevaron de vuelta papas, cacao, maíz, caña de azúcar, y otras especies, estableciendo así una red de intercambio invisible, también llamada virtual, de nutrientes entre los dos continentes. Con los avances en la navegación y la apertura del comercio a India y América se produce un crecimiento de estas redes de intercambio, acompañado de una aceleración en los ritmos en los que estos se llevan a cabo. A mediados del siglo



Figura 1. Rutas de intercambio comercial Españolas y Portuguesas en el siglo XVI (tomado de Wikimedia commons) y red mundial de tráfico de barcos de carga (mayores a 10.000 GT) entre distintos puertos durante el año 2007 (modificado de Kaluza et al. 2010¹)

XVI el Galeón de Manila viajaba ya dos veces al año entre Filipinas y México, para el transporte de materias primas y productos agrícolas, sumándose a las ya establecidas rutas de comercio entre Europa y Asia. Eventualmente, estas redes adquirieron un carácter global (Figura 1) y junto con las especies domesticadas de plantas y animales (cultivos y ganado) que se intercambian hubo un movimiento subyacente de otras muchas especies, como patógenos y especies consideradas exóticas en los ecosistemas de destino, además del tráfico ilegal de personas y fauna silvestre (Figura 2).

El fósforo es un caso icónico de cómo los humanos hemos alterado desde hace siglos los ciclos biogeoquímicos. Las

islas de guano de las costas del Perú se formaron a lo largo de cientos a miles de años ya que las condiciones meteorológicas (i.e. aridez extrema) permitieron la acumulación de excretas de aves marinas generando depósitos que alcanzan 30 a 50 metros de profundidad. Durante el siglo XIX el guano se explotó para ser utilizado como fertilizante en Europa y Estados Unidos ya que tiene un alto contenido de fósforo y nitrógeno. En el máximo apogeo de extracción de guano, entre 1840 a 1880 se extrajeron y exportaron más de 20 millones de toneladas de guano¹¹, más adelante profundizaremos en el impacto del comercio internacional sobre el movimiento del fósforo en la biósfera.

1. El agua virtual y la huella de agua

El agua es un recurso escaso y fundamental en los procesos bioquímicos de todo ser vivo. Desde una perspectiva económica, el agua también ocupa un lugar sumamente importante, pues cada proceso productivo humano que puede ir desde la fabricación de un zapato, confección de ropa, hasta el cultivo de una fruta o verdura; consume una cantidad específica de agua. Este consumo de agua que está involucrado en la producción de un producto se ha denominado agua virtual¹²; y su acumulado a nivel de lo que consume un individuo o nación, la huella de agua (water footprint¹³). En los últimos años la cuantificación del agua virtual y la huella del agua ha cobrado mucha importancia a efectos de evaluación y planificación económico-ambiental. Así, por ejemplo, se ha calculado el agua virtual asociada a distintos procesos productivos, principalmente agrícolas y ganaderos, obteniendo como indicador final la cantidad de litros de agua consumida para producir un kilogramo de carne, fruta u otro producto agropecuario (Figura 3).

Sin embargo, cuando se habla de consumo asociado a un producto determinado hay que ser cautelosos y precisos, de manera que se eviten ambigüedades en el cálculo del agua virtual de cada proceso o producto. El consumo al que nos referimos es específicamente aquel volumen de agua que está disponible (tanto como agua superficial

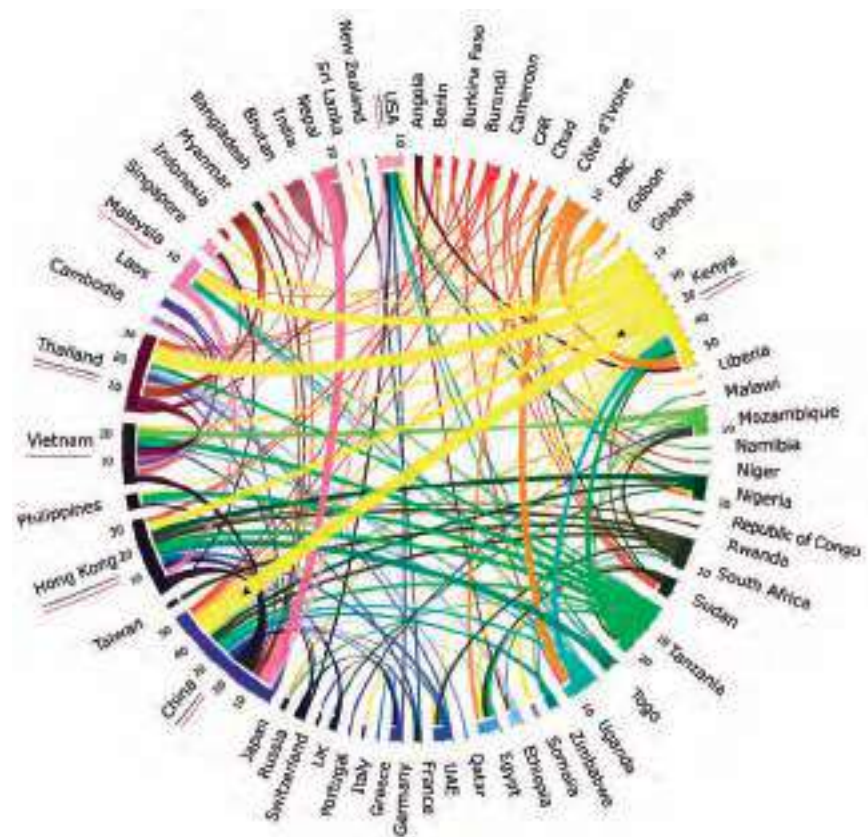


Figura 2. Asociados a los intercambios comerciales, también existen tráficos ilegales como los de vida silvestre que usan estas redes de intercambio entre los países. En la figura se muestra la red de tráfico ilegal de vida silvestre donde las líneas conectan países que proveen y que compran especies o sus subproductos. Este tipo de actividad económica corresponde a una red internacional de intercambio de productos penalizada por leyes y tratados, que representa una seria amenaza a la biodiversidad y que acelera los efectos del cambio global. Red de tráfico ilegal de elefantes (modificado de Patel et al. 2015¹⁰)

o como subterránea) en una cuenca, pero que deja de estarlo debido a factores tales como la evapotranspiración por parte de las plantas, la filtración a los cuerpos subterráneos, el movimiento hacia otras cuencas o el océano, o la “incorporación” del agua a productos que son posteriormente cosechados o extraídos. Dada esta definición podemos tomar como ejemplo, el agua virtual asociada a un kilogramo de carne de vacuno. En este caso, hasta el 98% del consumo de agua considerado se refiere al agua utilizada para el crecimiento del alimento para el ganado (cereales, alfalfa, hierbas, entre otras) cuyo origen proviene del aporte directo de la lluvia o neblinas (i.e. Agua Verde) y también de acuíferos, ríos y lagos (i.e. Agua Azul) usados en la irrigación de los cultivos y para el consumo directo de los animales. El resto toma en cuenta el agua que es contaminada por los desechos de origen animal (i.e. Agua Gris). Con esto se obtiene que para

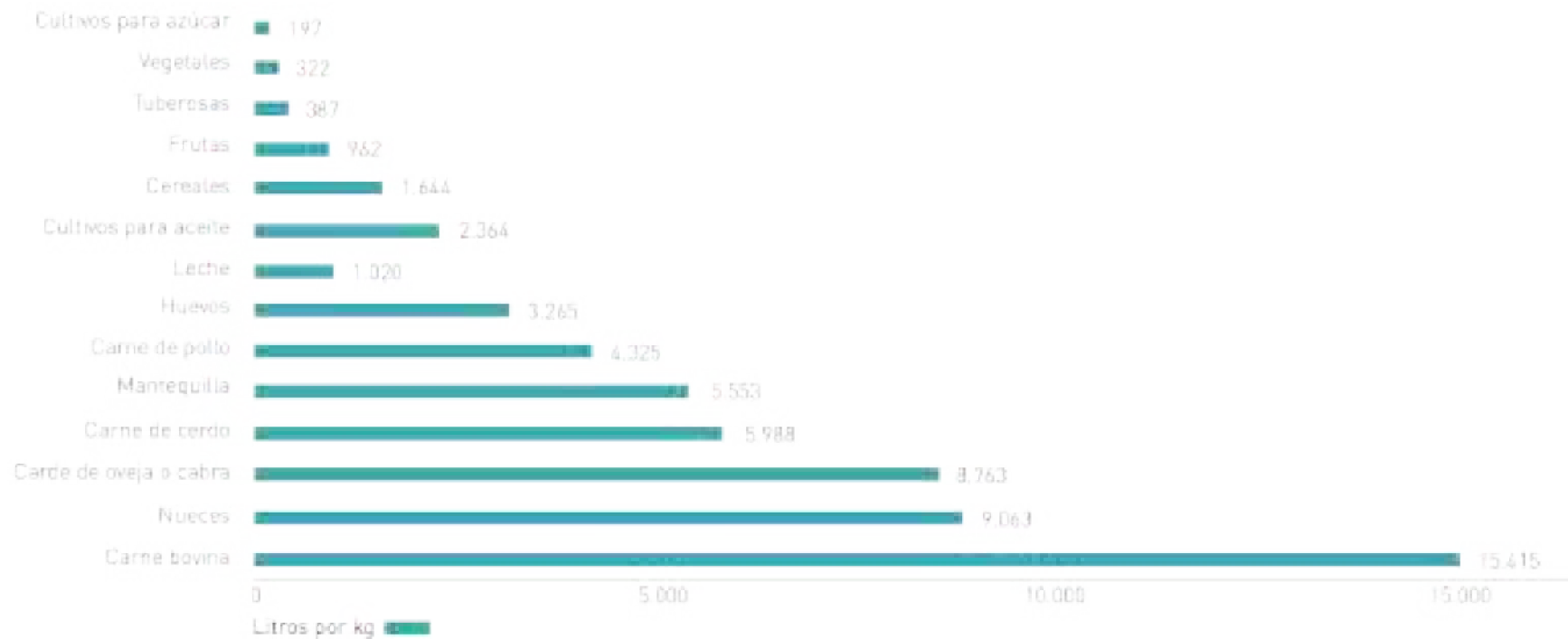


Figura 3. Agua virtual asociada a distintos productos agropecuarios

producir un kilogramo de vacuno se consume la gigantesca suma de 15.415 litros de agua, por lo que la exportación de carne desde Uruguay o Argentina a China representa un movimiento de agua virtual o “invisible” y una alteración de los reservorios (e.g. agua subterránea) y los flujos (e.g. evapotranspiración) del ciclo del agua de América del Sur. Así las cosas, cuando China importa 100 kg de carne desde Uruguay, tenemos un flujo de agua virtual de 1.541.500 litros de agua desde Uruguay a China. Lo mismo sucede con los productos agrícolas; pensemos en el agua utilizada para hacer crecer una planta de soja en Argentina, la cual es finalmente consumida en Asia o Europa. Lo importante de enfatizar es que cuando un país exporta un producto a otro país, está exportando agua en forma virtual, como veremos más adelante otros nutrientes importantes como nitrógeno y fósforo, causando desbalances.

Otro caso más complejo sería, por ejemplo, calcular el agua virtual asociada a la producción de energía hidroeléctrica. En este caso, el agua que utiliza la planta para mover el generador no es consumida puesto que el agua fluye en su curso natural y por lo tanto, en ese sentido, no habría gasto virtual involucrado. Sin embargo, la acumulación de grandes cuerpos de agua en las represas implica un aumento en la cantidad de agua evaporada en comparación a lo que sucede en condiciones naturales. Esta pérdida, que de hecho es bastante considerable es un

efecto neto de la actividad humana y por lo tanto es parte de su huella de agua.

En el caso de la generación eléctrica también es importante considerar la huella hídrica asociada al transporte de la energía. Hoy en día, los lugares en donde se concentra el consumo de energía eléctrica pueden estar a miles de kilómetros de los lugares en donde ésta se genera. Un claro ejemplo es el caso de Chile, cuyas centrales hidroeléctricas se localizan en las zonas rurales y casi vírgenes del sur como algunas de la Patagonia, mientras que el consumo de ésta se focaliza principalmente en el centro del país y particularmente en su capital (Santiago) a 1.400 kilómetros de distancia. De esta manera, este consumo de agua se vuelve invisible por dos motivos: primero, porque es un consumo indirecto ya que el agua se pierde al ser acumulada en las represas; y segundo, porque este consumo se localiza a cientos o miles de kilómetros del lugar en donde se sitúa el consumidor.

Si tomamos en cuenta todos los productos comercializados a nivel global y calculamos el agua virtual asociado cada uno, obtenemos una red global de intercambio de agua virtual. En el año 2007, el flujo de agua virtual global fue de 576 kilómetros cúbicos de agua, lo que equivale a un 22% del consumo de agua total de la agricultura¹⁴. En España, por ejemplo, entre 1995 y 2009 el 25% del agua

contenida en los productos de la industria agro-alimentaria se consume en otros países comportándose como un exportador neto de agua virtual. Estas tendencias se han acrecentado debido al crecimiento de la demanda interna a través de cambios en el patrón de consumo y a un estilo de vida de las poblaciones humanas, que involucra grandes impactos ambientales a escalas tanto locales como globales¹⁶. No obstante, el análisis global del mercado virtual del agua entre 1965 y 2010 revela que, en general, los países han aumentado su dependencia del agua que se produce en el extranjero. España y Brasil están dentro de aquellos países donde la demanda de agua virtual no ha manifestado mayores cambios, mientras en Chile la dependencia se ha incrementado en los últimos 30 años.

Los grandes volúmenes de agua que se mueven a través de las redes comerciales es un ejemplo más de la disrupción metabólica de la que habló Marx en el Capital asociada a la creciente separación entre los lugares de producción y los de consumo. Esta disrupción, según dijo Marx traería degradación en las zonas de producción y contaminación en en las zona de consumo. Un ejemplo de degradación, es la zona de Almería en el sur de España la cual paradójicamente es una importante zona de producción agrícola a nivel europeo y al mismo tiempo una de las zonas más áridas del continente (Figura 4). Ésta aparente paradoja es el síntoma de un problema ambiental severo asociado a la sobreexplotación de los acuíferos lo cual traerá consecuencias importantes para el funcionamiento de los sistemas ecológicos (erosión, extinciones locales de especies, potencial colapso de tramas tróficas) y sociales (e.g. migración y colapso económico). Esto es muy preocupante, sobretodo en un contexto en que las demandas de agua y alimento seguirán creciendo, tal como la población humana, en tanto que la temperatura del planeta aumentará y las precipitaciones disminuirán en muchos lugares del mundo, como España y Chile.

2. El movimiento de nutrientes en las redes de intercambio comercial

Junto con el agua otro recurso fundamental desde el punto de vista ecológico son los nutrientes minerales. Dentro

de ellos, el nitrógeno y el fósforo tienen una especial relevancia ambos por ser constituyentes de los aminoácidos y ácidos nucleicos. Los organismos vivos requieren de fósforo y nitrógeno para crecer, ya que este proceso implica sintetizar proteínas por medio de los ácidos nucleicos (e.g. RNA) y consumir energía contenida en el ATP (Adenosin trifosfato). Por esto, la concentración de estos nutrientes en el suelo y las plantas modulan las características tróficas (e.g., longitud y complejidad de las cadenas tróficas) en los ecosistemas (ver Capítulo 8). Los nutrientes disponibles en el suelo son absorbidos por las plantas y se almacenan en los productos que luego son exportados, o se pierden junto a los desperdicios de la producción, y por escurrimiento y **lixiviado**, lo que genera una disminución progresiva en la disponibilidad de nitrógeno, fósforo en los suelos.

A través de su historia, el hombre se ha dado cuenta de la importancia de estos nutrientes para la industria agropecuaria y es así como a fines del siglo XIX emerge el comercio del nitrato natural (con alto contenido de nitrógeno que puede ser absorbido por las plantas y cuyos principales depósitos se encuentran en el Desierto de Atacama en Chile) y del guano (corresponde a excrementos de aves marinas y otros animales ricos en fósforo y nitrógeno y cuyos depósitos se encuentran en las costas de Perú y Sudáfrica) que se transforman en productos de gran valor usados en la industria agrícola como fertilizantes principalmente en Estados Unidos y Europa. El movimiento de nutrientes cuya producción y acumulación obedecen a condiciones locales (como es el caso del guano y del salitre) y su posterior uso en otros lugares donde no existía naturalmente, puede llevar a importantes desbalances ecosistémicos, lo mismo que la producción sintética de nitrato a través del proceso de Haber-Bosch¹⁷.

Al igual que en el caso del agua, la intensificación en los procesos productivos agropecuarios, sumado al aumento de la población y del consumo de un mundo cada vez más interconectado, ha generado una serie de problemáticas en la abundancia de nutrientes en los suelos lo cual es especialmente aparente en países de África, Latinoamérica y algunas partes de Asia que son principalmente exportadores de productos agropecuarios. La pérdida de nutrientes por sobreexplotación puede llevar a una merma



Figura 4. Invernaderos en Almería. Foto Francisco I. Pugnaire

económica tal como se ha demostrado para los países de África subsahariana¹⁸.

Para subsanar el déficit en nutrientes, algunos países agrícolas importan grandes cantidades de fertilizantes minerales. Esto ha levantado la alerta sobre la capacidad que puedan tener los países exportadores de estos minerales para abastecer la creciente demanda de estos

productos. En el caso particular del fósforo esto es aún más alarmante. El fósforo se obtiene principalmente de rocas sedimentarias, cuya formación demora tiempos de escalas geológicas. Actualmente, el 90% de las reservas de fósforo del mundo pertenecen a cinco países. Dentro de ellos está Estados Unidos, que ha reportado tener 25 años de reservas de fósforo, por lo que incluso ha empezado a importar este mineral, como estrategia de

protección. El precio del fósforo se ha casi triplicado entre 2006 y 2016.

Así como se calcula la “huella del agua”, también se puede calcular la “huella del fósforo”, que incluye tanto el consumo per cápita nacional asociado a las dietas y consumo de carne, como el del fertilizante utilizado para crecer el alimento que posteriormente se utiliza para obtener productos de origen animal¹⁹. Es importante mencionar que el 72% de la huella de fósforo mundial tiene que ver con la producción de ganado y productos de origen animal, y que el 39% del fósforo contenido en los animales, por ejemplo, en los huesos, se desecha sin recuse o reciclaje. En términos generales, la huella del fósforo mundial, ha aumentado en un 38% desde el fin de la Segunda Guerra Mundial hasta el 2007. Sin embargo, hay mucha varianza en este promedio global, ya que mientras en algunos países africanos la huella de fósforo incrementó de 0,35 kg de fósforo per cápita por año a 7,64 kg, en otros países como China la huella de fósforo ha incrementado un 400% o directamente ha disminuido, como es el caso de Canadá¹⁹.

Una parte importante de los productos exportados a nivel mundial y de los nutrientes contenidos en ellos van a parar principalmente a Europa y algunas zonas de Asia como China o Japón, los cuales son “sumideros” o grandes almacenes de nutrientes. Esto conlleva otros problemas principalmente en las ciudades donde estos productos son consumidos y posteriormente desechados. Así, los nutrientes se acumulan en las aguas negras y residuos sólidos, causando problemas de contaminación en los cuerpos de agua en donde se descargan y fenómenos de **eutrofización**, que a su vez generan cambios importantes en las características físico-químicas del agua, aumentando la biomasa de organismos vivos, pero disminuyendo la biodiversidad. En el peor de los casos, este flujo de nutrientes a los ecosistemas acuáticos da lugar a proliferaciones de microorganismos y a la creación de zonas sin oxígeno (ver infografía y Capítulo 7).

Una manera útil de visualizar estos cambios en los ciclos biogeoquímicos es a través del análisis de los flujos de

nutrientes a distintas escalas espaciales, desde el nivel planetario al nivel de país o cuenca. En la Figura 5, por ejemplo, se muestra el balance anual de fósforo de la ciudad de Beijing²⁰ y en la infografía se presenta la red de intercambio de nitrógeno a nivel planetario. Esta red, generada el año 2014²¹, se basa en los contenidos de nitrógeno que se encuentran en productos agropecuarios. La cantidad de nitrógeno que se mueve anualmente en el mundo producto de redes de intercambio comercial, entre 1961 y 2010 ha aumentado desde 3 a 24 Tg, es decir, se ha octuplicado, y hoy en día corresponde a un tercio del nitrógeno contenido en la producción agrícola y de alimento para ganado.

Es claro que existe un gran desequilibrio en los balances de los flujos de agua y nutrientes de los países llevando así a la explotación de ciertas zonas en beneficio de otras. Y al parecer en el caso del fósforo nos acercamos a una etapa de crisis, en donde el mercado de fertilizantes no dará abasto ante la creciente demanda por alimentos. Ante esta situación, expertos proponen distintas alternativas de prevención, más que mitigación (Figura 6). Dentro de estas propuestas está el paso desde una cultura extractiva del fósforo a una cultura recicladora de nutrientes. Esto se hace mediante la utilización de abonos naturales como el estiércol, la reutilización de los residuos de la cosecha e incluso de los residuos domiciliarios. Como se mencionó, la mayor parte de los nutrientes se acumulan en las grandes ciudades, siendo luego transportados por ríos hasta el océano, o quizás quedando acumulados en vertederos, haciendo sumamente necesaria la incorporación de políticas que incentiven la movilización de estos nutrientes hacia las zonas rurales, en donde son altamente requeridos para de esta manera minimizar los costos que el cambio global, desde la perspectiva de las redes de comercialización de agua y nutrientes, tiene sobre los ecosistemas.

Dado que el fósforo en estado mineral (roca de fosfato) es un recurso no renovable, cuyas reservas son controladas por un pequeño grupo de países (Marruecos, Iraq, China, Argelia y Siria) y que ha empezado a ser cada vez más escaso y más caro, es fundamental

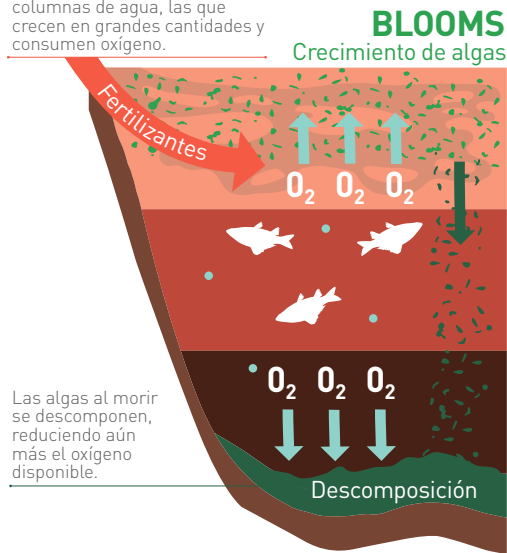
CONSECUENCIAS PARA EL CAMBIO GLOBAL DE LAS REDES DE INTERCAMBIO COMERCIAL

Las redes de intercambio comercial han generado una profunda alteración en los flujos de elementos químicos (fósforo, nitrógeno, agua, entre otros) cuyos alcances son globales. Estas alteraciones se reflejan en una modificación constante de los ecosistemas terrestres y acuáticos que muchas veces dan origen a eventos catastróficos como las denominadas zonas de muerte.

ZONAS DE MUERTE

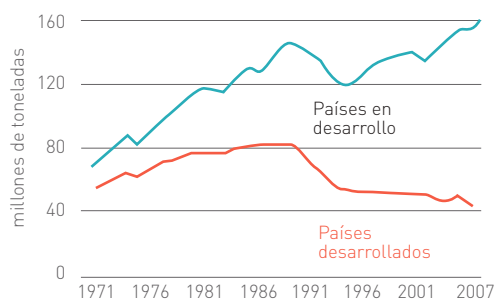
Las zonas de muerte son áreas hipóxicas (bajas en oxígeno) que se generan en zonas costeras y grandes lagos del mundo, causadas por una excesiva contaminación por nutrientes, producto de las actividades humanas, en asociación con otros factores que reducen el oxígeno requerido para mantener la mayoría de la vida marina. Estas zonas se producen en las regiones costeras habitadas y donde la vida marina está muy concentrada.

Los fertilizantes aumentan la cantidad de algas en las columnas de agua, las que crecen en grandes cantidades y consumen oxígeno.



Las algas al morir se descomponen, reduciendo aún más el oxígeno disponible.

CONSUMO MUNDIAL DE FERTILIZANTES



EL USO EXCESIVO DE FERTILIZANTES EN LA INDUSTRIA AGRÍCOLA ES LA PRINCIPAL CAUSA DE LA CONTAMINACIÓN POR NUTRIENTES EN EL AGUA



A NIVEL GLOBAL LAS EMISIONES DE CO₂ ASOCIADAS AL INTERCAMBIO DE BIENES Y SERVICIOS SE HAN INCREMENTADO DE UN **20%** A UN **28%** (1990) (2008)

Red global de flujo de nitrógeno en productos agropecuarios. Lassaletta *et al.* (2014)²¹

Dirección de los mayores flujos brutos de agua virtual asociados al intercambio de productos industriales y agrícolas entre 1996 y 2005. Modificado de Hoekstra & Mekonnen (2012)¹³

Zonas de muerte causadas por el incremento del flujo de nutrientes en las zonas costeras

ENTRE 100 Y 200 AÑOS LE TOMABA A UNA PARTÍCULA DE NITRÓGENO SER TRANSPORTADA DESDE EL NORTE DEL ATLÁNTICO HASTA EL CONO SUR POR LAS CORRIENTES MARINAS. **HOY, EL NITRÓGENO CONTENIDO EN UNA FRUTA PUEDE DAR LA VUELTA AL PLANETA EN DOS DÍAS**



AGUA VIRTUAL

Es el agua que está involucrada en todas las actividades requeridas para la obtención de un producto.

1 kilo de producto	Litros de agua utilizados en su producción
Fruta 	 962 l
Leche 	 1.020 l
Huevos 	 3.265 l
Carne de pollo 	 4.325 l
Carne de cerdo 	 5.988 l
Carne de res 	 15.415 l



Trabajadores colectando guano en la isla Guañape Norte frente a las costas de Trujillo, Perú, mayo 2008. Foto Tomás Munita

asegurar su disponibilidad futura. Hoy en día se extraen aproximadamente 16 millones de toneladas de fósforo con fines de producción de alimento, pero sólo una quinta parte llega al consumidor final de éste y el resto se pierde en el proceso, por lo que mejoras en la eficiencia de extracción y uso podrían hacer una gran diferencia en asegurar la disponibilidad de este nutriente esencial. En este contexto es necesario aumentar la eficiencia tanto en la producción agrícola como en la cadena de abastecimiento de alimentos para evitar esta enorme cantidad de pérdida de nutrientes en el proceso productivo²²⁻²⁵. Además, se sugieren cambios en la dieta de los consumidores para preferir alimentos que sean menos

intensivos en el uso de nutrientes. Sumando todos estos factores, se podría contrarrestar una evidente saturación en la industria extractiva de minerales, específicamente, la del fósforo (ver Figura 6).

El impacto de las redes de intercambio comercial sin duda no se restringe a los flujos de agua y nutrientes. Mover cosas requiere energía y este proceso de uso de energía genera desechos o compuestos químicos que se generan como consecuencia del uso de energía para mover bienes de consumo a través de medios de transporte como barcos, camiones y aviones. Entre éstos el más importante es el CO₂ dado que es un importante gas de efecto invernadero

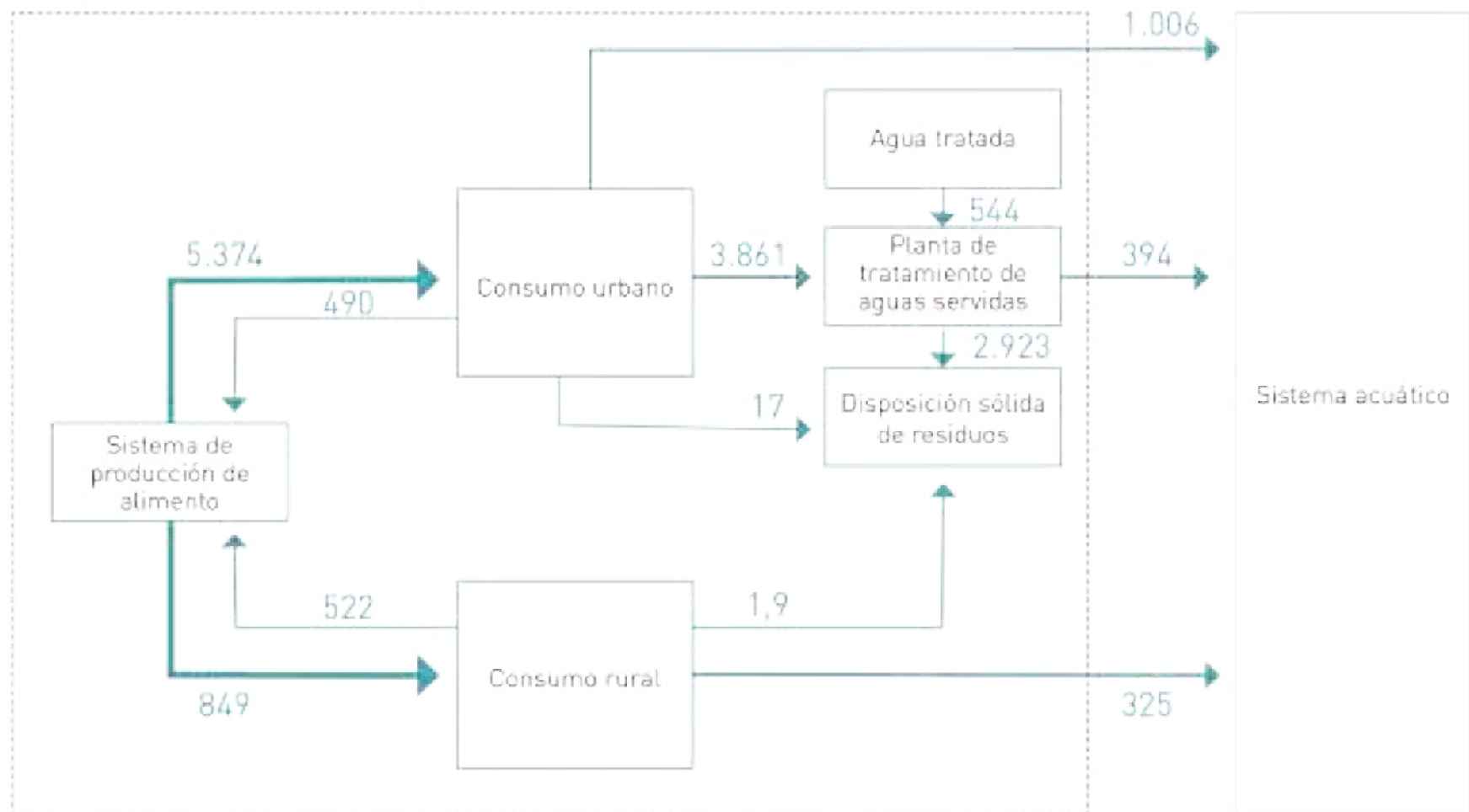


Figura 5. Diagrama de flujos de fósforo en Beijing en 2008 (modificado de Qiao et al. 2011²⁰)

y el principal responsable del calentamiento global de la atmósfera. La cantidad de CO₂ que genera el comercio puede ser muy importante. Para el caso de Brasil, las emisiones asociadas al intercambio de bienes no-energéticos fueron aproximadamente un 10 a 14% del total de las emisiones de carbono de la economía Brasileña en el año 1995²⁶. A nivel global las emisiones de CO₂ asociadas al intercambio de bienes y servicios han incrementado de un 20% (4,3 Gt CO₂) en 1990 a un 28% (7,8 Gt CO₂) de las emisiones globales de CO₂ al año 2008 y han seguido incrementando²⁷.

3. Implicancias para las políticas públicas

El intercambio de bienes y servicios es una actividad humana que ha estado presente por miles de años, desde los tiempos en que el planeta estaba dominado por sociedades de cazadores recolectores hasta la modernidad. Lo que ha cambiado ha sido la extensión espacial que ahora ha

tomado este intercambio y el hecho que existen zonas que se comportan principalmente como fuentes de productos y otras como sumideros de productos agropecuarios, industriales, electrónicos entre otros y los productos que ellos contienen. En este contexto y considerando que la producción de estos bienes genera gases de efecto invernadero, es aconsejable que la producción se realice con tecnologías que sean cada vez más eficientes y limpias, sin duda que es labor de los gobiernos generar leyes y reglamentos así como instituciones y procesos que permitan hacer posible una transición hacia la generación de tecnología de bajo o nulo impacto.

A una micro escala, dado que somos nosotros los consumidores los responsables de generar mercado para muchos productos, es importante tener la posibilidad de decidir qué comprar y optar por aquellos productos cuya huella de carbono o agua o químicos nos parezca adecuada. Para esto es importante la trazabilidad de los productos tal que se establezcan sus impactos, al menos en agua utilizada y CO₂ emitido, en su producción.

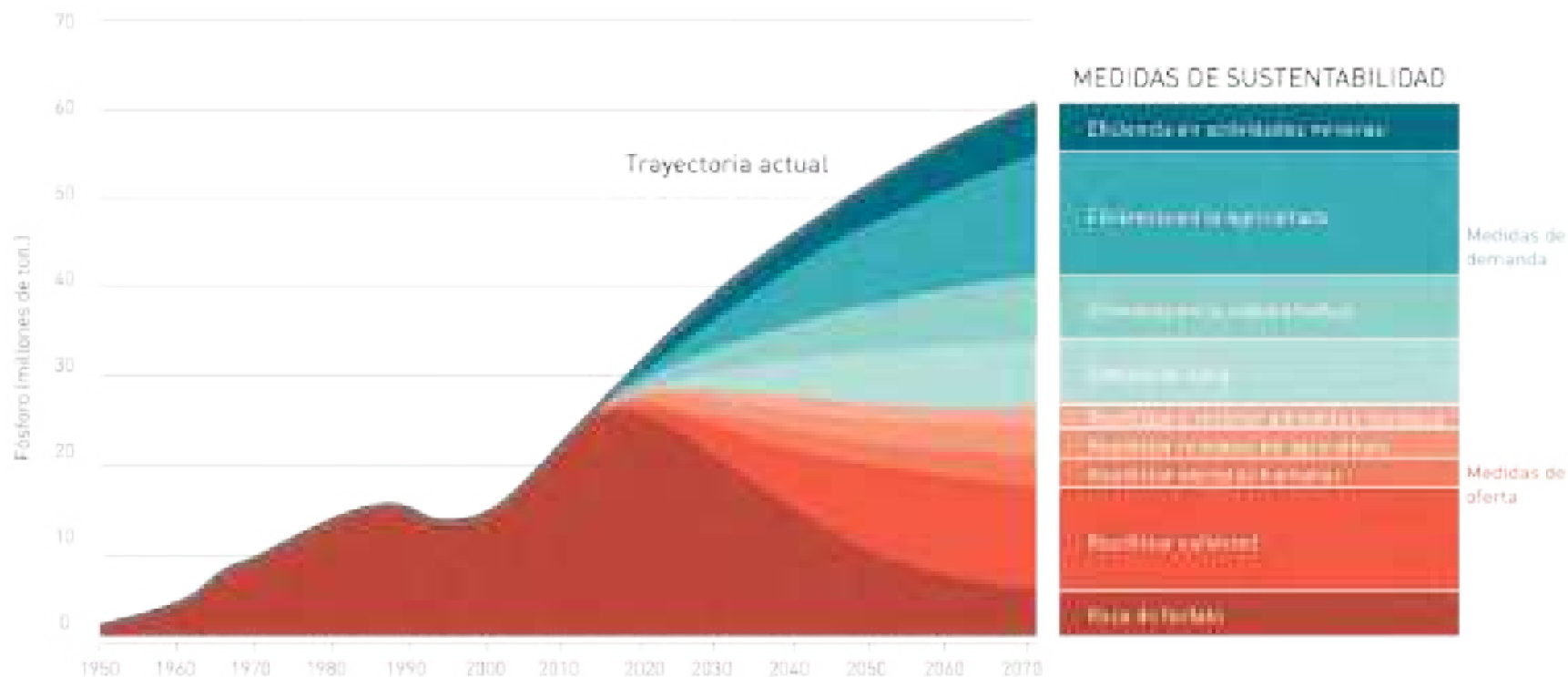


Figura 6. Posible escenario futuro del mercado del fósforo, contemplando cambios drásticos en la cadena productiva y en el uso de fertilizantes debido al agotamiento del fósforo mineral (modificado de Cordell & White 2013²³)

El reciclaje, por otro lado, es una acción importante para limitar el uso desmesurado de fertilizantes y sobretodo de aquellos que como el fósforo tienen disponibilidad limitada.

Las redes de intercambio comercial entre los países son importantes para el crecimiento económico pero no se justifica que los estados subsidien las exportaciones sin considerar los impactos ambientales negativos que estas conllevan, desde transformación de la vegetación nativa en campos de cultivos o plantaciones forestales, pasando por la extinción de especies, la invasión de otras, y el calentamiento del planeta. Un ejemplo de esto tiene que ver con el impacto de la apertura comercial de un país (o qué tanto de su Producto Interno Bruto se debe a comercio con otras naciones) y la tasa de deforestación. Un estudio reciente²⁸ muestra como la apertura de la economía se asocia a la deforestación en el Amazonas, principalmente llevado por la exportación de soja y carne y la necesidad de asignar grandes extensiones de tierra al cultivo y ganadería. Algo similar sucede en la zona del Chaco compartida por Argentina, Bolivia y Paraguay donde ha habido una acelerada tasa de destrucción del bosque seco para reemplazarlo por plantaciones de soja y ranchos ganaderos²⁹ y en el Sudeste de Asia, y Latinoamérica a consecuencia de los cultivos de palma aceitera³⁰. Todos

estos impactos generan pérdidas en biodiversidad y una degradación en el funcionamiento de los ecosistemas y en la contribución de la naturaleza para las personas. Al final del día seremos nosotros los más perjudicados, si los estados no incorporan los impactos ambientales asociados a las redes comerciales.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 Kaluza, P., Kölsch, A., Gastner, M. T., & Blasius, B. The complex network of global cargo ship movements. *Journal of the Royal Society Interface* 7, 1093-1103 (2010).
- 2 Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277, 494-499 (1997).
- 3 Chapin III, F. S., et al. Consequences of changing biodiversity. *Nature* 405, 234-242 (2000).
- 4 Lubchenco, J., et al. The Sustainable Biosphere Initiative: an ecological research agenda: a report from the Ecological Society of America. *Ecology* 72, 371-412 (1991).
- 5 Rostworowski, M. Mercaderes del valle de Chíncha en la época prehispánica: un documento y unos comentarios. *Revista Española de Antropología Americana* 5, 135-177 (1970).
- 6 Nuñez, L., & T. S. Dillehay Movilidad giratoria, armonía social y desarrollo en los Andes Meridionales: patrones de tráfico e interacción económica. Antofagasta, Chile: Universidad Católica del Norte (1979).
- 7 Hirth, K., & Pillsbury, J. Redistribution and Markets in Andean South America. *Current Anthropology* 54, 642-647 (2013).

- 8 Shackleton, N., & Renfrew, C. Neolithic trade routes re-aligned by oxygen isotope analyses. *Nature*, 228, 1062-1065 (1970).
- 9 Séfériadès, M. L. Spondylus and long-distance trade in prehistoric Europe. *na* (2009).
- 10 Patel, N. G., Rorres, C., Joly, D. O., Brownstein, J. S., Boston, R., Levy, M. Z., & Smith, G. Quantitative methods of identifying the key nodes in the illegal wildlife trade network. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 7948-7953 (2015).
- 11 Skaggs, Jimmy M. *The Great Guano Rush*. Saint Martin's Press. New York, USA (1970).
- 12 Allan, J.A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible In: *ODA, Priorities for water resources allocation and management*, ODA, London, pp. 13-26 (1993).
- 13 Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, 3232-3237 (2012).
- 14 Dalin, C., Konar, M., Hanasaki, N., Rinaldo, A., & Rodriguez-Iturbe, I. Evolution of the global virtual water trade network. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, 5989-5994 (2012).
- 15 Clark, S., Sarlin, P., Sharma, A., & Sisson, S. A. Increasing dependence on foreign water resources? An assessment of trends in global virtual water flows using a self-organizing time map. *Ecological Informatics* 26, 192-202 (2015).
- 16 Duarte, R., Pinilla, V., & Serrano, A. The Spanish food industry on global supply chains and its impact on water resources. *Water* 7, 132-152 (2014).
- 17 Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z., & Winiwarter, W. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636-639 (2008).
- 18 Drechsel, P., Kunze, D., & De Vries, F. P. Soil nutrient depletion and population growth in sub-Saharan Africa: a Malthusian nexus? *Population and Environment* 22, 411-423 (2001).
- 19 Metson, G. S., Bennett, E. M., & Elser, J. J. The role of diet in phosphorus demand. *Environmental Research Letters* 7, 44043-44052 (2012).
- 20 Qiao, M., Zheng, Y. M., & Zhu, Y. G. Material flow analysis of phosphorus through food consumption in two megacities in northern China. *Chemosphere* 84, 773-778 (2011).
- 21 Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Garnier, J., Leach, A. M., & Galloway, J. N. Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. *Biogeochemistry* 118, 225-241 (2014).
- 22 Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19, 292-305 (2009).
- 23 Cordell, D., & White, S. Sustainable phosphorus measures: strategies and technologies for achieving phosphorus security. *Agronomy* 3, 86-116 (2013).
- 24 Elser, J.J. Phosphorus: a limiting nutrient for humanity? *Current Opinion in Biotechnology* 23, 833-838 (2012).
- 25 Gaxiola, A., Edwards, M. & Elser, J.J. A transgenic approach to enhance phosphorus use efficiency in crops as part of a comprehensive strategy for sustainable agriculture. *Chemosphere* 84, 840-845 (2011).
- 26 Machado, G., Schaeffer, R., & Worrell, E. Energy and carbon embodied in the international trade of Brazil: an input-output approach. *Ecological Economics* 39, 409-424 (2001).
- 27 Fernández-Amador, O., Francois, J. F., & Tomberger, P. Carbon dioxide emissions and international trade at the turn of the millennium. *Ecological Economics* 125, 14-26 (2016).
- 28 Faria, W. R., & Almeida, A. N. Relationship between openness to trade and deforestation: Empirical evidence from the Brazilian Amazon. *Ecological Economics*, 121, 85-97 (2016).
- 29 Fehlenberg, V., Baumann, M., Gasparri, N. I., Piquer-Rodriguez, M., Gavier-Pizarro, G., & Kuemmerle, T. The role of soybean production as an underlying driver of deforestation in the South American Chaco. *Global environmental change*, 45, 24-34 (2017).
- 30 Koh, Lian Pin, and David S. Wilcove. Is oil palm agriculture really destroying tropical biodiversity?. *Conservation Letters* 1, 60-64 (2008).

ARTÍCULOS COMENTADOS

Elser, J.J. Phosphorus: a limiting nutrient for humanity? *Current Opinion in Biotechnology* 23, 833-838 (2012).

Este artículo presenta en detalle el problema del fósforo, su uso no sustentable y la necesidad de generar políticas que impidan impactos negativos sobre las actividades económicas. Los autores de este artículo señalan que las grandes cantidades de P se extraen anualmente para producir fertilizante que se aplica en apoyo de la 'Revolución Verde' eventualmente termina en ríos, lagos y océanos donde causa costosas eutroficcaciones. Además, dado el aumento de la población humana, la expansión del consumo de carne y la proliferación de presiones bioenergéticas, los autores señalan que existe inquietud respecto de la viabilidad geológica, económica y geopolítica a largo plazo del P mineral para la producción de fertilizantes. Estos problemas, según los autores, ponen de relieve la naturaleza no sostenible del uso actual de P por parte del hombre. Los autores sugieren que para lograr la sostenibilidad en el uso del P, las granjas deben ser más eficientes en la forma en que lo usan, mientras que la sociedad en su conjunto debe desarrollar tecnologías y prácticas para reciclar P de la cadena alimentaria.

Koh, Lian Pin, and David S. Wilcove. Is oil palm agriculture really destroying tropical biodiversity?. *Conservation Letters* 1, 60-64 (2008).

Uno de los primeros trabajos que cuantifica el impacto negativo del comercio de Palma aceitera sobre la destrucción y fragmentación del bosque tropical con un foco en el Sudeste Asiático. Sin embargo, las plantaciones de palma aceitera se han expandido en Iberoamérica, especialmente en México, Brasil, Colombia y Ecuador, por lo que la demanda global por aceite vegetal tiene grandes impactos en la deforestación en estas áreas. Este trabajo se focaliza en la palma de aceitera, uno de los cultivos ecuatoriales de más rápida expansión en el mundo. Los productores de los dos mayores países que producen palma aceitera, Indonesia y Malasia, han afirmado que los bosques no están siendo talados para cultivar palma aceitera. Sin embargo, los resultados presentados por estos autores sugiere que durante el período 1990-2005, 55% -59% de la expansión de la palma de aceite en Malasia, y al menos 56% de esa en Indonesia ocurrió a expensas de los bosques. Utilizando datos sobre diversidad de aves y mariposas en los bosques y tierras de cultivo de Malasia, los autores argumentan que la conversión de bosques primarios o secundarios (explotados) a plantaciones de palma aceitera puede ocasionar pérdidas significativas de biodiversidad.

Fehlenberg, V., Baumann, M., Gasparri, N. I., Piquer-Rodriguez, M., Gavier-Pizarro, G., & Kuemmerle, T. The role of soybean production as an underlying driver of deforestation in the South American Chaco. *Global Environmental Change*, 45, 24-34 (2017).

Un trabajo que documenta el grado de transformación del ecosistema Chaqueño y los motores que están detrás de estos cambios y el como varían e interactúan entre los países que comparten este ecosistema. Este estudio se focaliza en la amenazas que afectan a los bosques secos tropicales y las sabanas de América del Sur asociadas a la ganadería y la producción de soja y tratan de dar pistas sobre la importancia relativa de ambos factores y como estos afectan la deforestación. El estudio se lleva a cabo en el en el Chaco, una ecorregión de 110 millones de hectáreas compartida por Argentina, Bolivia y Paraguay, y con cerca de 8 millones de hectáreas de deforestación entre 2000-2012. Los análisis desarrollados por los autores sugieren que la producción de soja fue un impulsor directo de la deforestación en el Chaco argentino, mientras que la ganadería estuvo significativamente asociada con la deforestación en los tres países. Aunque la evidencia también apunta a que el cultivo de soja en Argentina podría estar indirectamente relacionado con la deforestación en el Chaco boliviano y paraguayo. Este estudio demuestra que la deforestación en el Chaco parece estar impulsada principalmente por la creciente demanda global de soja, aunque a nivel regional otros motores inmediatos también son importantes. Finalmente los autores sugieren que la importancia de implementar políticas que regulen la producción agrícola en el Chaco y que tengan en cuenta la variación regional en los factores de la deforestación dentro y entre los países.

Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Garnier, J., Leach, A. M., & Galloway, J. N. Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. *Biogeochemistry*, 118, 225-241 (2014).

Primer análisis que reporta el impacto de los intercambios comerciales sobre el ciclo del nitrógeno a nivel mundial. Este trabajo analiza la creciente importancia del comercio internacional de alimentos en la alteración del ciclo del N a escala global. En primer lugar, utilizando la información sobre el comercio en todos los países del mundo los autores cuantifican el N negociado anualmente en el período 1961-2010 observando que en ese período, la cantidad de N comercializado entre países se ha multiplicado por ocho (de 3 a 24 TgN) y la mayor parte corresponde a la alimentación animal. A nivel regional el flujo de N se ha intensificado dramáticamente durante este período no solo debido a un aumento en la población sino también en el proporción de proteína animal en la dieta de algunos países. Hoy en día, en términos de proteínas y N, un pequeño número de países (por ejemplo, Estados Unidos, Argentina y Brasil) están alimentando al resto del mundo. A escala global, el sistema se está volviendo menos eficiente debido a la desconexión entre la producción agrícola y ganadera en las regiones especializadas, lo que aumenta los impactos ambientales. Finalmente, los autores señalan que la dieta humana es un impulsor claro de los cambios observados, las soluciones deben depender no solo de los productores, sino también de los consumidores.

GLOSARIO

Eutrofización Proceso asociado al aumento de la cantidad de nutrientes en un cuerpo de agua lo que genera aumentos en la productividad y biomasa de plantas y algas y en algunos casos grandes crecimientos poblacionales de microorganismos con consecuencias negativas en la calidad del agua y disponibilidad de oxígeno.

Lixiviación Proceso por el cual compuestos químicos se pierden desde el suelo mediante su disolución, absorción o acomplejamiento en la fase acuosa del suelo y posteriormente transportados.

Funciones ecosistémicas. Procesos biológico, geoquímico y físico que mantienen la dinámica de los ecosistemas (ej. productividad primaria, fijación de nitrógeno, ciclado de nutrientes, etc).

A mediados del siglo XIX se reconoce mundialmente la importancia del guano como fertilizante dando origen a la fiebre del guano entre 1840 y 1870. Esto atrajo a comerciantes americanos y europeos a la isla de Chincha en Perú en búsqueda de guano de calidad (con alto contenido de nitrógeno), generando un tráfico de ciudadanos Chinos y de las islas del Pacífico quienes trabajaban en condiciones deplorables muchos de ellos como esclavos. La importancia comercial del guano llevó a los Estados Unidos a pasar la denominada Acta del Guano en 1856 que le permitió a cualquier ciudadano de ese país reclamar como suya cualquier isla, no habitada y no reclamada por otro gobierno, y con depósitos de guano. El comercio de guano decayó con la introducción del salitre. Foto Soluble Pacific Guano, 1857-83. Mystic Seaport, Mystic, Conn., #1994.5

SOLUBLE PACIFIC GUANO


FOR

CORN

POTATOES

TOBACCO

GRASS



ROOT

AND

GRAIN CROPS

Of all kinds

GARDEN

VEGETABLES

&c., &c.

**ITS USE SECURES TO THE FARMER A
LARGE AND REMUNERATIVE CROP,**

And has been found to pay better than any other investment.

FOR PARTICULARS CALL ON





Glaciar exploradores un ejemplo de retroceso glaciar en los Campos de Hielo Norte, Patagonia Chilena. Este glaciar llego a su máxima extensión hace 9,200 años aproximadamente. La que mantuvo, no obstante la existencia de retrocesos y avances asociados a eventos como la Pequeña Edad del Hielo (ver Capítulo 1), hasta cerca de 1975. En 1997 había retrocedido un kilómetro y 15 años mas tarde esta distancia se amplió a entre 1,5-2 kilómetros, de acuerdo al trabajo reciente de la Dra. María Mardones, Centro EULA, Universidad de Concepción. El primer plano de ésta fotografía (suelos color rojizo) se pueden observar los depósitos asociados al retroceso de 1975, luego los depósitos más grises son de 1997 y posteriormente los depósitos mas oscuros se asocian al año 2013. Foto Pablo A. Marquet

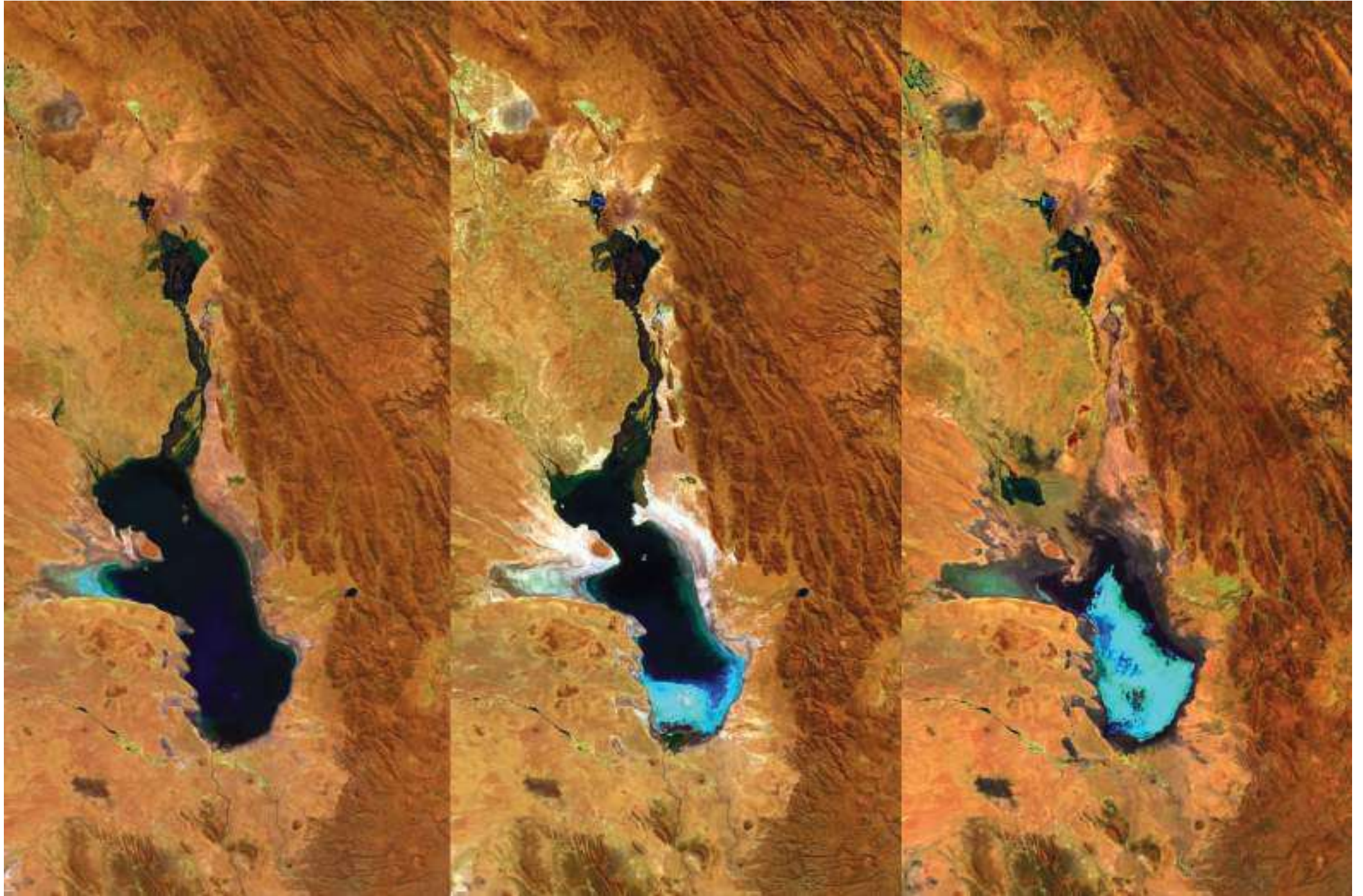


Foto del Lago Poopo en el altiplano de Bolivia tomadas por el minisatelite Proba-V de la Agencia Espacial Europea en, de izquierda a derecha, abril del 2014, 20 de julio de 2015 y 22 de enero de 2016 a medida que este lago, el segundo más grande de Bolivia, perdiera su espejo de agua. En el pasado el lago llegó a tener una superficie de 3000 km². Foto ESA/Belspo producida por VITO

Predicciones del cambio climático en Iberoamérica

Mariana M. Vale, Lorena Gómez-Aparicio, Juan J. Armesto, Luara Tourinho y Vinicius F. Farjalla

RESUMEN

Para América del Sur, las predicciones actuales apuntan a un aumento de temperatura en todo el continente, sobre todo en la porción norte, junto a reducciones de la precipitación en la porción norte y centro-oeste, y un aumento de precipitación en la porción sur, asociadas a eventos extremos de lluvia. Los bosques amazónicos tienen un papel fundamental en la regulación de las lluvias en gran parte del continente, por lo que la deforestación progresiva, asociada a las predicciones de savanización de la Amazonía bajo escenarios de cambio climático, tiene el potencial de causar reducciones de la precipitación en regiones agrícolas extensas del sur de Amazonía y el noroeste de Argentina. El último informe del IPCC predice para Europa un calentamiento de entre 0,3 y 4,8°C para el siglo XXI, dependiendo del escenario de emisiones. Desde el 2003 Europa ha sufrido varias olas de calor extremas en verano, las cuales se predice que ocurran con una frecuencia de hasta dos años en la segunda mitad del siglo XXI bajo un escenario de altas emisiones. Los impactos de las olas de calor serán particularmente fuertes en los países del sur de Europa, incluyendo la Península Ibérica. Los cambios proyectados para el periodo 2081-2100 indican además una disminución de la precipitación de hasta el 30% en la Península Ibérica y resto de la cuenca Mediterránea, particularmente durante el verano. Dicho patrón es totalmente contrario al proyectado para los países del norte de Europa, donde se espera un incremento de la precipitación. También se espera un incremento de los episodios de tormenta en la mayor parte del continente europeo.

1. ¿Cómo se hacen las predicciones de cambio climático?

Para comprender los efectos ambientales del cambio climático en Iberoamérica, es preciso, inicialmente, entender cómo será el clima de Iberoamérica en el futuro. Predecir el clima futuro no es una tarea fácil, pues las predicciones dependen del conocimiento de una serie de factores tales como los patrones de circulación atmosférica y de los océanos, el papel de cada elemento presente en estos dos compartimentos (i.e. gases invernadero, partículas y agua), así como la variación de sus concentraciones en el futuro. Actualmente, poseemos un conocimiento razonable del funcionamiento de la atmósfera y los océanos, así como del papel de los principales elementos presentes en estos compartimentos en la regulación del clima, con excepción de los **aerosoles** y el vapor de agua en la atmósfera que son menos conocidos. En contraste, tenemos muchas incertidumbres acerca de cómo serán las concentraciones de estos dos elementos en los compartimentos atmosférico, terrestre y oceánico y cómo estas nuevas condiciones alterarán los patrones de circulación atmosférica y oceánica. En consecuencia, la difícil tarea de predecir el clima futuro puede ser abordada en dos etapas principales: 1) predicción de las concentraciones atmosféricas y oceánicas de elementos que actúan en la regulación del clima, y 2) proyección del clima futuro sobre la base del conocimiento actual de física atmosférica y oceánica y de las concentraciones previstas de los elementos controladores del clima derivados de la etapa anterior. Debido a la alta complejidad de esta labor, que desarrollan

de manera descentralizada especialistas en diversas disciplinas ubicados en diferentes regiones del planeta, la verificación y análisis de las informaciones generadas acerca del cambio climático son coordinadas por un Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (o IPCC por su sigla en inglés).

La primera etapa en la predicción del clima consiste en anticipar la concentración de gases, **aerosoles** y partículas responsables de la regulación del clima en la atmósfera, a partir de la definición de escenarios de emisiones de estos elementos conocidos como “Precursores representativos de concentraciones” (o RCPs por su sigla en inglés). Los RCPs representan diferentes historias posibles sobre el futuro político, socio-económico y ambiental del planeta. Estos se basan en proyecciones futuras del tamaño de la población humana, crecimiento económico, cambio socio-ambiental, uso del suelo, desarrollo tecnológico e implementación de políticas internacionales relacionadas con el clima, entre otros indicadores. Estos indicadores de proyección futura tienen relación directa y conocida con las emisiones de gases hacia la atmósfera. Por ejemplo, de manera simplificada, cuanto más crece el número de habitantes humanos del planeta, mayores serán las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera, pues cada individuo emite CO_2 a través de sus actividades diarias y la ocupación de tierras de cultivo para alimentar la población.

A continuación, cada escenario queda constituido por informaciones cualitativas y cuantitativas del desempeño de nuestra sociedad que tienen implicaciones para las emisiones de elementos que aumentan el forzamiento radiativo (retención de calor) de la atmósfera y que, consecuentemente, actúan en la regulación del clima global. El IPCC basa sus predicciones en cuatro escenarios diferentes: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5, cuyos números equivalen al forzamiento radiativo de cada escenario estimado para el año 2100, relativo a los niveles de elementos y cobertura vegetal de la época pre-industrial (1750). Por ejemplo, el RCP 2.6 se caracteriza por un escenario de mitigación y reducción futura de la emisión de gases invernadero, partículas y **aerosoles** que en conjunto resultarían en un aumento de energía radiativa de 2.6 W m^{-2} en la atmósfera. En cambio, el escenario RCP 8.5 se

caracteriza por altas tasas de emisiones de gases, partículas y **aerosoles**, que producirían un gran aumento de energía de 8.5 W m^{-2} en la atmósfera (Figura 1). En términos cuantitativos, el RCP 2.6 se caracteriza por concentraciones de CO_2 en la atmósfera que alcanzarían los 421 ppm en el año 2100, en tanto que el RCP 8.5 se caracteriza por concentraciones de CO_2 en la atmósfera de 936 ppm en el año 2100 (como referencia, las concentraciones de CO_2 alcanzaron valores sobre 400 ppm a partir del año 2015).

La predicción del clima se inicia con una estimación de las concentraciones futuras de gases, aerosoles y partículas en la atmósfera, todos los cuales actúan en la retención de calor

A partir de las concentraciones futuras de gases, **aerosoles** y partículas en la atmósfera, y con un buen conocimiento de física atmosférica, es posible proyectar el clima futuro. Las proyecciones del clima se obtienen a partir de modelos matemáticos conocidos como Modelos de Circulación General (o GCM por su sigla en inglés). Estos modelos se basan, por razones prácticas, en la división de la superficie total del planeta en celdas, cada una de las cuales cubre una superficie que varía entre 1 y 5 grados de latitud x longitud (Figura 1). Las celdas también se superponen en capas verticales que comprenden los diversos estratos atmosféricos y zonas oceánicas. Cada celda contiene información sobre el clima, como temperatura, presión, y movimientos horizontales y verticales de las masas de aire y agua. Las celdas vecinas están conectadas, es decir, alteraciones en determinadas condiciones de una celda se reflejan en las celdas del entorno. Cuanto menor es el tamaño de cada celda y/o mayor el número de capas, mejor es la exactitud de los resultados previstos en las escalas espaciales menores (regiones, por ejemplo). Además de la cantidad de información sobre los mecanismos que controlan el clima, hay también un gran número de celdas y capas en las cuales las predicciones deben ser hechas simultáneamente, volviendo así la tarea imposible en términos de tiempo con la capacidad computacional que tenemos actualmente. En este sentido, es necesario

ESTRUCTURA DE LOS MODELOS DE CIRCULACIÓN GLOBAL

Estos modelos globales representan la base sobre la cual se generan las predicciones del clima y las estimaciones de la concentración futura de la atmósfera en relación con gases, aerosoles y partículas que afectan la retención del calor.

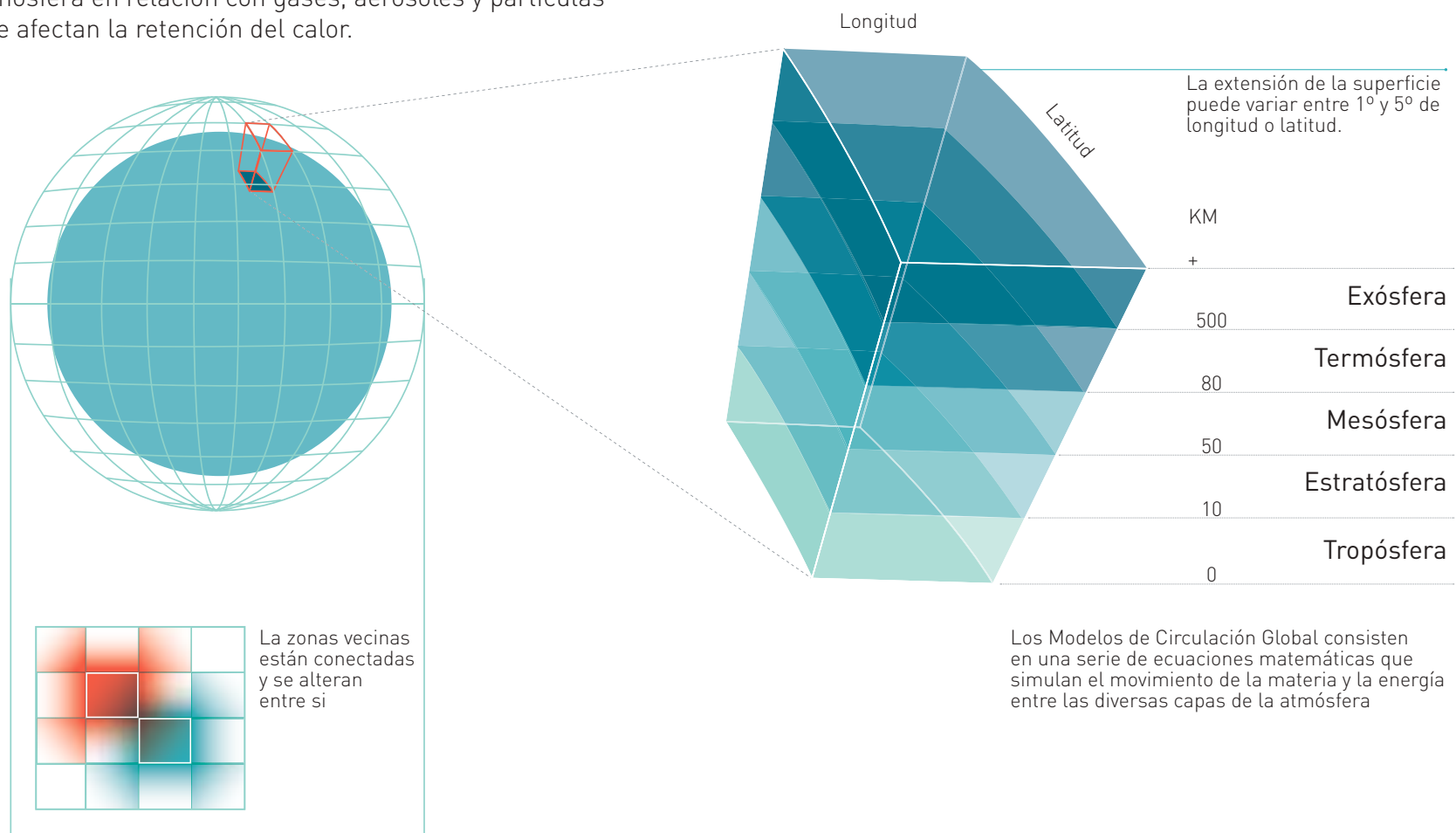


Figura 1. Las proyecciones climáticas se construyen a partir de modelos matemáticos complejos llamados "Modelos de Circulación Global" (del inglés, GCM). Estos se basan en características físicas de la atmósfera y en la concentración de los diversos elementos que la componen y que actúan sobre el clima, como los gases de efecto invernadero (ej. CO₂) y los aerosoles. Predicciones razonables de la concentración futura de estos elementos en la atmósfera, basadas en características de modelos económico-sociales, son, por tanto, fundamentales para entender el clima futuro

tomar decisiones con respecto al tipo y precisión de la información que se debe incorporar en cada GCM. Para que estas decisiones no resulten en serias interferencias para la predicción final del clima (que tiene en cuenta la emisión de gases esperada de acuerdo a los diferentes escenarios), cada uno de los escenarios de emisión de gases es analizado por más de un GCM. Hay cerca de 18 centros de modelización del clima que analizan alrededor de 25 GCM. Así, al final varios grupos independientes, cada uno analizando un determinado GCM, producen sus resultados que son compilados para generar una predicción

del clima futuro correspondiente a un determinado escenario de emisión de gases (Figura 1). Las proyecciones de los modelos climáticos pueden luego contrastarse con datos reales de campo, especialmente conocimiento del clima pasado, con el fin de evaluar su capacidad predictiva. Sin embargo, con frecuencia hay un problema de escalas, ya que es complejo hacer predicciones locales a partir de modelos globales (ver más abajo), y a veces se debe estimar las probabilidades de cambio climático de un área en función de los números de modelos que hacen predicciones similares versus los que difieren.



Inundaciones en Perú después del fenómeno de El Niño en 2017. Según las predicciones de cambio climático para Iberoamérica, estos eventos climáticos serán cada vez más frecuentes e intensos. Foto Ministerio de Defensa de Perú. CC BY 2.0

Las proyecciones del clima se obtienen a partir de modelos matemáticos, conocidos como "Modelos de Circulación Global"

La mayoría de los fenómenos biológicos ocurren a escalas espaciales sensiblemente menores que aquellas utilizadas para generar los GCMs. Diferencias entre la cara norte o sur de una montaña, o la presencia de cuerpos de agua, tienen gran influencia en el clima y la biota local, pero estas diferencias no están directamente contempladas en los GCMs. Así, para prever el clima a una escala más

pequeña se hace necesario refinar los modelos globales. Hay dos soluciones para este problema: generar Modelos Climáticos Regionales (o RCMs) o reducir la escala de los GCMs considerando las peculiaridades locales. Los RCM tienen las mismas características (y las mismas dificultades) de los GCMs, pero abarcan con mayor detalle una escala espacial más fina. Estos requieren un esfuerzo computacional tan intenso como los GCMs, pues la disminución de la escala (del planeta a una región) se ve compensada por un aumento del número de celdas en el espacio regional. Para la predicción climática en Iberoamérica algunos de los principales RCM existentes son PRECIS

(Providing Regional Climates for Impacts Studies), REGCM3 (Regional Climate Model, third generation) y BESM (Brazilian Earth System Model)¹. Para la Península Ibérica el esfuerzo de predicción climática es coordinado por grandes proyectos europeos como PRUDENCE, ENSEMBLES, y actualmente EURO-CORDEX². La segunda técnica mencionada, basada en la reducción de escala de los GCMs, ha sido bastante utilizada por ser más simple y tener menor coste computacional que los RCMs. Este método se basa en el conocimiento actual de la relación entre el clima a una escala espacial global o regional y el clima a una escala local, y en el supuesto de que los cambios futuros en el clima regional previstos por los GCMs tendrán consecuencias proporcionales en el clima a escala local. Los dos métodos poseen ventajas y desventajas y la elección de uno u otro dependerá, en gran parte, del objetivo del estudio.

Pero ¿cómo evaluamos el desempeño de un determinado modelo (GCM, RCM, o reducción de la escala de GCM a escala local) en la predicción del clima? El método más utilizado se basa en invertir el modelo que se quiere poner a prueba para predecir el clima del pasado en el área de extensión del modelo (global o regional). Las simulaciones generadas por el modelo se comparan con datos reales disponibles y los modelos considerados más probables son aquellos que tuvieron buena capacidad para predecir el clima pasado. Cabe señalar que, para un mismo modelo, puede haber importantes diferencias entre regiones geográficas y en la calidad de las predicciones de distintas variables climáticas. Por ejemplo, sobre la base del método de evaluación citado anteriormente, sabemos que los GCM hacen mejores predicciones de la temperatura que de la precipitación.

2. Predicciones de cambios climáticos para América del Sur

América del Sur tiene un conjunto único de ecosistemas que albergan una biodiversidad realmente impresionante a escala planetaria. Sus ecosistemas, sin embargo, están fuertemente amenazados por la degradación y pérdida de la vegetación nativa para acomodar demandas

nacionales e internacionales por productos agropecuarios y biocombustibles, así como por los grandes incendios de origen antropogénico. El nivel de amenaza, sin embargo, varía mucho entre los ecosistemas de Sudamérica: mientras que la Amazonía retiene más del 80% de cobertura forestal³, el Bosque Atlántico brasileño retiene sólo cerca del 12%⁴, y el bosque Mediterráneo de Chile central menos del 7%⁵. Además, la mayoría de los fragmentos forestales remanentes son demasiado pequeños para albergar poblaciones viables de especies de tamaño grande y mediano, o mantener la integridad de las redes de interacciones (tróficas y mutualistas) que sustentan la biodiversidad local. Recientemente, los cambios climáticos emergen como una nueva amenaza, con un gran potencial de alteración de las condiciones ambientales, tanto en áreas degradadas como en áreas bien preservadas.

El informe del IPCC⁶ sobre América del Sur revela que el clima de la región ha estado cambiando de manera importante en las últimas décadas. Se han observado aumentos de temperatura en toda la región, con excepción de una pequeña área en la costa del Océano Pacífico. Los cambios de precipitación han sido espacialmente más variables, asociados con una reducción de temperatura en algunas áreas y con un aumento en otras, incrementando en muchas zonas los déficits hídricos para los seres humanos y los organismos silvestres. En los últimos 40 años se ha registrado un aumento de temperatura entre 0,7°C y 1°C en toda América Central y del Sur. No es sorprendente, por lo tanto, que se haya observado también la contracción de los glaciares de la región, afectando también el volumen, flujo y la estacionalidad de los ríos que nacen en la cordillera de los Andes, que atraviesa Sudamérica de norte a sur, y que descargan sus aguas hacia el este y el oeste del cordón Andino. Una excepción interesante al patrón general de calentamiento de América Latina es el enfriamiento de cerca de 1°C observado en la costa del Pacífico del Perú hasta la región central de Chile, a pesar que datos climáticos de la última década de la zona de Chile central muestran calentamientos y sequía prolongados⁷. Este enfriamiento está aparentemente asociado a una intensificación del afloramiento de aguas frías de capas más profundas del

CAMBIO CLIMÁTICO EN IBEROAMÉRICA

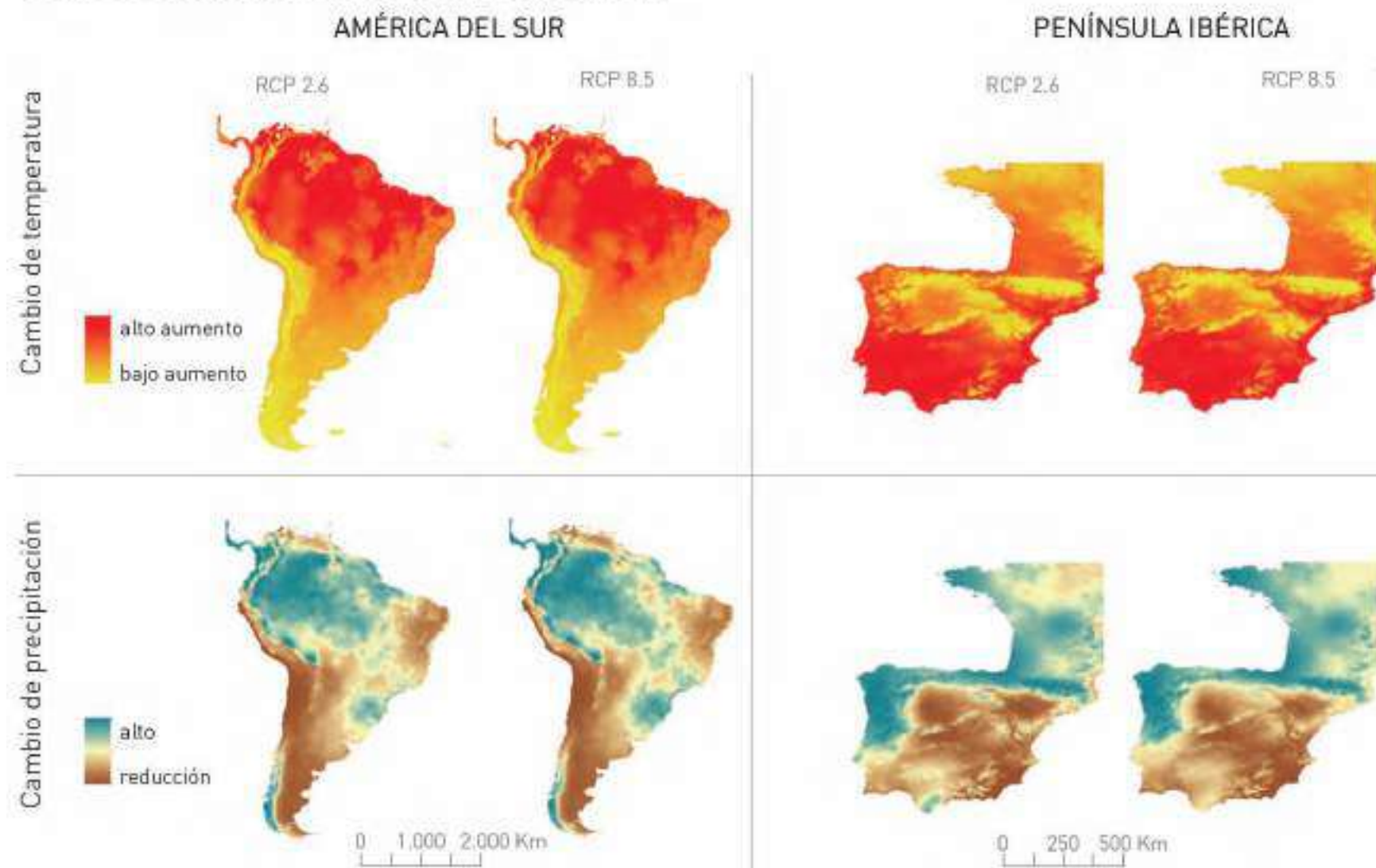


Figura 2. Cambios en la temperatura y precipitación proyectada para 2070 a partir del modelo de circulación global (GCM) HadGEM2-ES, considerando dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero (RCP). Los valores representan la diferencia entre la temperatura y la precipitación en 2070 y los valores del presente (medias del período 1960-1990). Los valores de temperatura representan diferentes niveles de aumento (gradaciones de rojo), mientras que los valores de precipitación representan tanto aumentos (gradación azul) como reducciones (gradación marrón). Los cálculos fueron realizados a partir de datos disponibles en <http://www.worldclim.org>

océano debido a una intensificación observada de los vientos alisios en la región⁸.

Se han observado también cambios consistentes en los patrones de precipitación, con una reducción de cerca de 1 mm/día en el patrón de lluvias de América Central y porción centro-sur de Chile y, al mismo tiempo, un aumento de alrededor de 0.6 mm/día en el patrón de lluvias en el sudeste de Sudamérica. Este aumento de precipitación, sin embargo, no parece haberse distribuido de forma homogénea a lo largo del año, sino que está

asociado a una mayor frecuencia de eventos extremos de lluvias. En 2011, por ejemplo, lluvias torrenciales en el sudeste de Brasil causaron deslizamientos de tierra e inundaciones de proporciones catastróficas, matando a cientos de personas. También se han observado eventos extremos de lluvia (de uno o dos días en el verano) en Chile semiárido, con efectos catastróficos para los habitantes y ecosistemas del sur del desierto de Atacama. En la Amazonía, por el contrario, se han dado varios eventos de sequía intensa en las últimas décadas asociados con años de El Niño. No existe sin embargo consenso

en la comunidad científica sobre un patrón consistente de reducción de la precipitación en la Amazonía en las últimas décadas. Según el **IPCC**, los cambios climáticos descritos anteriormente parecen estar más asociados a la variabilidad natural o a la pérdida de cobertura vegetal que a los cambios propiamente climáticos. Curiosamente, sin embargo, las previsiones del **IPCC** respecto a cambios climáticos futuros para América Latina son a menudo parecidas a los cambios en condiciones que ya han sido observados, mediante instrumentos, en las últimas décadas. Estas previsiones para 2100 apuntan a un calentamiento de 1,7° a 6,7° C y una reducción del 22% de la precipitación del nordeste brasileño, un aumento del 25% en las lluvias del sudeste de América del Sur, y una reducción del 30-50% de la precipitación en el centro-sur de Chile, tendencia que ya se ha registrado en una disminución del caudal de los ríos en el margen sur de Sudamérica (Figura 2).

3. Predicciones de cambios climáticos para la Península Ibérica

La Península Ibérica supone un reto para los estudios de predicción de cambio climático dada su enorme variabilidad climática, desde el clima atlántico en el norte con precipitaciones de 2000 mm/año hasta las extensas zonas semiáridas del sureste caracterizadas por un importante déficit hídrico. Dicha diversidad climática resulta de su posición latitudinal en el límite norte de la región subtropical, su compleja topografía, y su carácter peninsular rodeado por dos masas de agua muy diferentes: el océano Atlántico y el mar Mediterráneo. A pesar de su heterogeneidad, existe clara evidencia de que en general el clima peninsular ha sufrido un importante aumento de la temperatura media del aire desde la década de los 60, de aproximadamente 0,3 °C/década, principalmente en primavera y verano⁹. Las temperaturas máximas y mínimas han sufrido la misma tendencia creciente, particularmente en el sur peninsular. Se ha dado también un incremento de la radiación solar, debido en gran parte al incremento de la nubosidad. En cuanto a la precipitación, si bien los patrones de cambio son bastante más complejos que

los de temperatura, las series regionales disponibles muestran una disminución de más del 28% en todo el territorio español desde mediados del siglo XX⁹. En conjunto, las recientes tendencias climáticas observadas para la Península Ibérica claramente revelan un escenario más cálido y seco en comparación con las décadas pasadas. Dicho patrón es similar al observado en otras áreas Mediterráneas, donde la tendencia general es hacia un escenario de menor disponibilidad de agua.

En cuanto a las predicciones de clima futuro, el último informe del **IPCC** predice para Europa un calentamiento de entre 0,3 y 4,8°C para el siglo XXI, dependiendo del escenario de emisiones¹⁰. Desde el 2003 Europa ha sufrido varias olas de calor extremas en verano, las cuales se predice que ocurran con una frecuencia de hasta dos años en la segunda mitad del siglo XXI bajo el escenario de altas emisiones (RCP8.5). Los impactos de las olas de calor serán particularmente fuertes en los países del sur de Europa, incluyendo la Península Ibérica. Los cambios proyectados para el periodo 2081-2100 indican además una disminución de la precipitación de hasta el 30% en la Península Ibérica y resto de la cuenca Mediterránea, particularmente durante el verano. Dicho patrón es totalmente contrario al proyectado para los países del norte de Europa, donde se espera un incremento de la precipitación. También se espera un incremento de los episodios de tormenta en la mayor parte del continente europeo¹¹.

4. El papel clave de la vegetación en la regulación del clima: el caso de la Amazonía

Los cambios en el clima se asocian generalmente con cambios en la distribución geográfica de las especies y los ecosistemas (ver Capítulo 13). Varios estudios han investigado estos cambios en América del Sur. A grandes rasgos, los estudios apuntan a una reducción del área de bosques tropicales y una expansión del área de sabanas. Aunque hay previsiones de una pequeña expansión sur del Bosque Atlántico, ésta resulta insignificante frente a las previsiones de una importante expansión de las





Pantano de Luna (León, España) tras la severa sequía de 2017 que dejó al descubierto las ruinas del pueblo de San Pedro de Luna que fue anegado tras la construcción del embalse hace más de seis décadas. Las sequías extremas serán uno de los eventos climáticos más frecuentes en los próximos años según las predicciones del IPCC. Derechos Reservados bajo Creative Commons CC0



Figura 3. La tormenta tropical en el fondo de esta foto se formó en la Cuenca del Río Amazonas, Amazonía Brasileña. El bosque es esencial para la formación de nubes de lluvia en la Amazonía. Con el proceso de sabanización de la Amazonía, tormentas de lluvia como ésta se volverán más raras. Foto: Vinicius F. Farjalla

sabanas hacia la Amazonía^{12,13}, acompañada también de un posible proceso de sabanización de los bosques^{14,15}, especialmente si la deforestación continúa. Estas previsiones son preocupantes no sólo porque la Amazonía es hogar de una increíble cantidad de animales y plantas, sino también porque tiene un importante papel en la regulación del clima regional y global. Esto sucede debido a la intensa transpiración y la producción de **aerosoles**

de la Amazonía¹⁶. La Amazonía funciona como un océano verde: una vasta superficie forestal que se extiende por debajo de la atmósfera, cuya inmensidad, humedad y exposición al viento se asemejan a los océanos en su papel de regulación climática¹⁶. Los árboles tienen un papel fundamental en esta regulación climática. Ellos son capaces de transferir enormes volúmenes de agua del suelo a la atmósfera, a través de la transpiración

de sus hojas y evaporación de las precipitaciones que son interceptadas por el dosel (Figura 3). Un solo árbol de gran tamaño puede bombear más de mil litros de agua por día¹⁶. En la Amazonía, el volumen de agua que es transportado del suelo a la atmósfera a través de la evapotranspiración es mayor que la descarga del propio río Amazonas¹⁶. Para que el agua presente en la atmósfera se convierta en lluvia, sin embargo, es necesario que existan **aerosoles** en suspensión que actúen como núcleos de condensación, en los cuales el vapor de agua se deposita favoreciendo el proceso de formación de nubes de lluvia. Los árboles también tienen un papel fundamental en este sentido, pues son responsables de la emisión de una categoría específica de **aerosoles**, los “compuestos orgánicos volátiles biogénicos” (BVOCs, por sus siglas en inglés), que funcionan como importantes núcleos de condensación sobre la Amazonía.

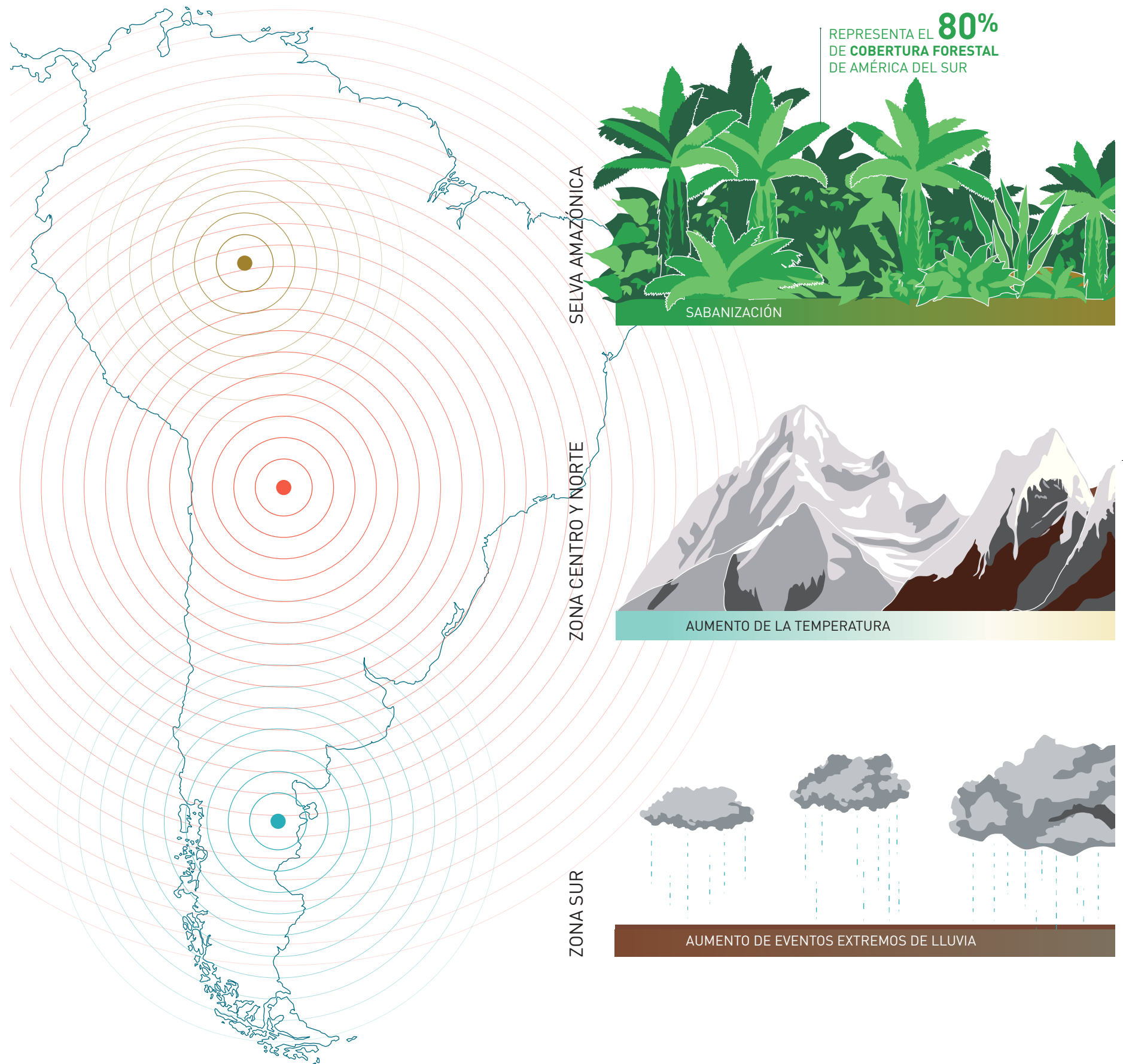
Los árboles de la Amazonía tienen, por lo tanto, un papel fundamental en la regulación de la precipitación. De hecho, los bosques tropicales funcionan como verdaderas bombas de agua que transportan humedad atmosférica de los océanos hacia los continentes¹⁷. En áreas sin cobertura forestal, las lluvias dependen de la humedad cargada por corrientes de aire provenientes del océano, pudiendo ocurrir en áreas que están sólo a unos cientos de kilómetros de distancia del océano. En las zonas boscosas, en cambio, las lluvias no dependen de la proximidad de los océanos, y pueden ocurrir a miles de kilómetros en el interior de los continentes. Esta bomba de humedad crea un flujo de aire húmedo que podemos llamar “ríos voladores”, que influye en la precipitación tanto a escala local, es decir, dentro de la propia Amazonía, como a escala regional, llevando humedad a otras regiones vecinas de América del Sur. Estos ríos voladores nacen a partir de la evaporación en la región ecuatorial del Océano Atlántico y son transportados por las corrientes de viento hacia el continente sudamericano, ganando un enorme volumen de agua al pasar sobre la selva amazónica. En el verano, al enfrentarse con la Cordillera de los Andes, estos ríos voladores desvían su trayectoria hacia el sur, “desaguando” finalmente bajo la forma de lluvias en diversas regiones al sur de la Amazonía, favoreciendo las selvas de montaña del oeste de Bolivia y Argentina¹⁸. Así,

la selva amazónica es responsable de la lluvia que irriga las sabanas del Brasil central, que son la zona agrícola más importante de América del Sur, además del sudeste del continente que albergan la mayor concentración poblacional e infraestructura del continente, y también de la región agrícola Chaqueña de Argentina. Debido al importante papel que la vegetación ejerce sobre los procesos climáticos, las nuevas generaciones de modelos de circulación global ahora incluyen la vegetación como un componente fundamental del proceso de modelización. El carbono almacenado en la biomasa de los árboles es también un compartimento significativo en relación al futuro de la concentración de CO₂ en la atmósfera, pues a medida que los bosques crecen y el área forestal aumenta éstos actúan como almacenes de carbono reduciendo la concentración de éste gas en la atmósfera. Cuando las selvas son destruidas o dejan de crecer, su carbono se transfiere a la atmósfera incrementando el calentamiento global.

En la Amazonía, el volumen de agua que se transporta desde los árboles a la atmósfera, a través de la evapotranspiración vegetal, es mayor que la descarga de agua del propio río Amazonas

Los efectos negativos del cambio climático sobre la Amazonía y la importante regulación climática que ejerce sobre América del Sur son exacerbados por la creciente degradación forestal en la región. La deforestación y los incendios forestales en la Amazonía crean un proceso de retroalimentación, involucrando fenómenos físicos, biológicos y socioeconómicos, que van intensificando la degradación forestal y los efectos del cambio climático. La deforestación actual de casi el 20% de la Amazonía ya ha afectado el clima local, con una pronunciada reducción de las tasas de transpiración del bosque y del carbono almacenado en la madera de los árboles, así como cambios en la dinámica de formación de nubes de lluvia y la duración de la estación seca¹⁶. Los modelos climatológicos indican que una deforestación del 40% de la Amazonía tiene grandes posibilidades de desencadenar una transición irreversible de bosque a sabana a gran

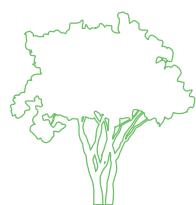
PRINCIPALES CAMBIOS ESPERADOS EN AMÉRICA DEL SUR ASOCIADOS AL CAMBIO CLIMÁTICO



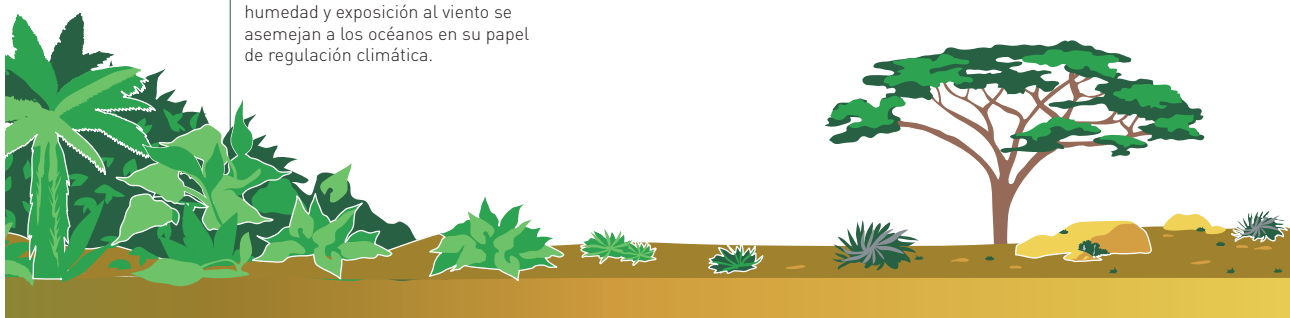


OCÉANO VERDE
RESPONSABLE DE LA LLUVIA LOCAL Y DE OTRAS REGIONES DE AMÉRICA DEL SUR

La Amazonía funciona como un océano verde. Por su inmensidad, humedad y exposición al viento se asemejan a los océanos en su papel de regulación climática.



UN SOLO ÁRBOL BOMBEA MÁS DE **1.000 LITROS DE AGUA** DIARIOS POR EVAPOTRANSPIRACIÓN Y EN CONJUNTO **TRANSPORTAN A LA ATMÓSFERA MÁS AGUA QUE EL PROPIO RÍO**

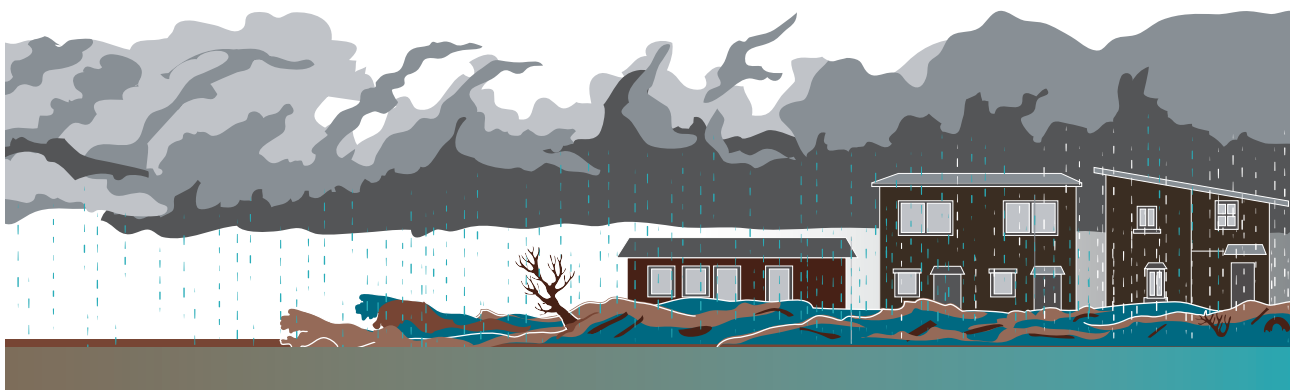


La sinergia entre la deforestación en la Amazonía y la reducción de las lluvias en virtud del cambio climático puede llevar a una transición irreversible de bosque a sabana, afectando los patrones de lluvia en diversas y alejadas regiones del mundo, incluyendo Europa y Asia.

Retroceso del glaciar Chacaltaya en Bolivia



Con el aumento de la temperatura en virtud del cambio climático ya se observa la contracción de los glaciares en la región, lo que afecta también el volumen, flujo y estacionalidad de los numerosos ríos que nacen en la cordillera de los Andes y los sistemas marinos costeros.



El aumento de la precipitación y eventos extremos de lluvias en virtud del cambio climático predice un aumento en la frecuencia de desastres como inundaciones y deslizamientos de tierra, amenazando la vida de millares de personas en zonas urbanas y rurales.

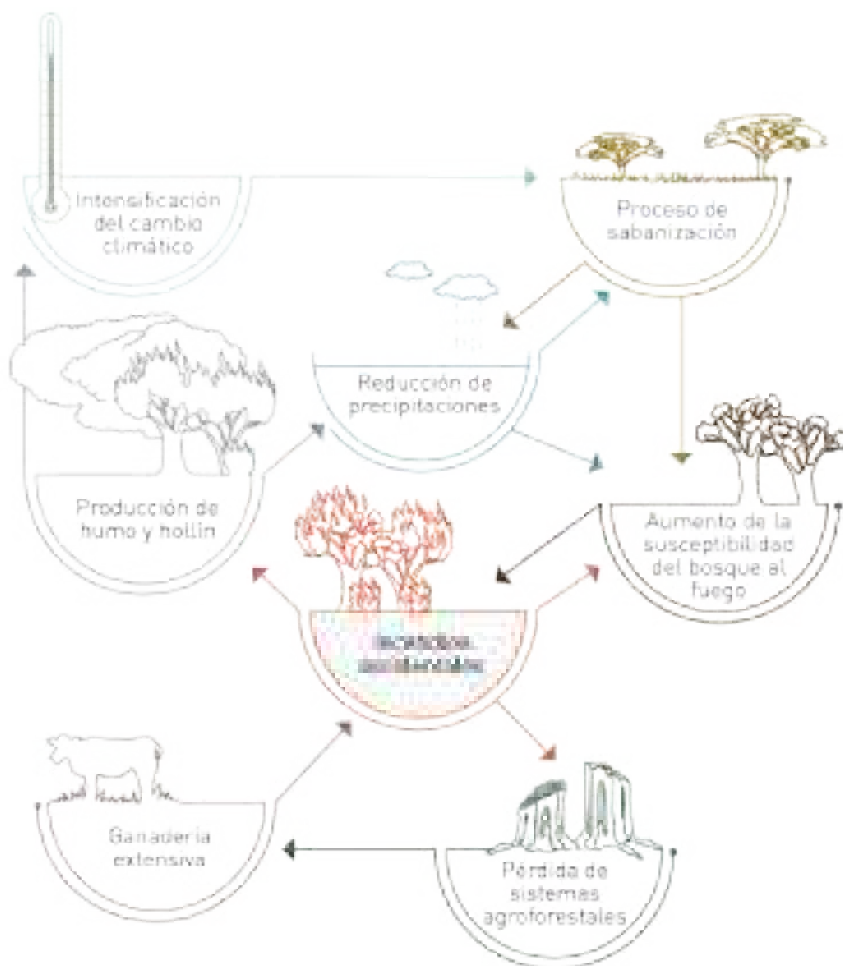


Diagrama que muestra las sinergias entre el Cambio Climático y la degradación forestal en la Amazonía. Construido a partir de Nepstad et al. (2001)²², Laurence & Williamson (2001)²³, Coe et al. (2013)²⁴

escala, afectando incluso a las partes más remotas de la Amazonía¹⁹. La deforestación de la Amazonía, además, tiene el preocupante potencial de afectar no sólo a la propia Amazonía y el continente sudamericano, sino también, a través de **teleconexiones**, puede alterar los patrones de lluvia en diversas y alejadas regiones del mundo, incluyendo América Central, América del Norte, Europa y Asia, con consecuencias negativas para la agricultura y para la población humana que habita esas regiones²⁰.

5. La degradación de los ecosistemas y el cambio climático: efectos combinados en la Amazonía

En la Amazonía, la degradación forestal actúa de forma sinérgica con los cambios climáticos, creando procesos

de retroalimentación. Las proyecciones indican que los cambios climáticos pueden propiciar un proceso de sabanización a gran escala de la Amazonía. Este proceso de sabanización reducirá la precipitación, a través de la reducción de la evapotranspiración de la vegetación. La sabanización también aumenta la susceptibilidad de la vegetación al fuego, aumentando, por lo tanto, la incidencia de incendios y, por ende, incrementando la concentración de CO₂ de la atmósfera. Los incendios forestales emiten gran cantidad de humo y hollín, que reducen la formación de núcleos de condensación, reduciendo así la precipitación. El humo está formado por gases de efecto invernadero, como el CO₂, que son causantes del cambio climático. La emisión de gases debido a la deforestación y quema de bosques en el planeta representa hoy cerca del 20% de las emisiones globales de carbono²¹.

Los incendios forestales también aumentan la susceptibilidad del bosque al fuego, pues matan los árboles del dosel, aumentando la penetración de luz y la disponibilidad de combustible (leña) en el suelo. Los incendios recurrentes también hacen que los sistemas de producción agroforestales, que muchas veces tienen menos impacto en la degradación forestal, sean menos atractivos económicamente, debido a las pérdidas de producción causadas por los incendios. Esto estimula los sistemas de producción extensivos, como la crianza de ganado, que son hoy responsables de la mayor parte de la deforestación en la Amazonía y que utilizan el fuego como técnica de manejo de pastizales. Muchas veces el fuego escapa al control humano, generando enormes incendios forestales, que aumentan la emisión de humo y hollín, así como la susceptibilidad del bosque a nuevos incendios. Finalmente, la fragmentación de los bosques, al modificar del paisaje forestal, originalmente continuo, también puede aumentar las probabilidades de incendio, debido a la mayor penetración de luz en los parches remanentes de bosque y al mayor calentamiento del material leñoso en el sotobosque, aumento de mortalidad de árboles en los bordes de los fragmentos, que aumentan la carga de combustibles secos, favorecen el aumento de efecto de los vientos en la desecación de los márgenes.

6. Conclusiones

Para la América del Sur, las predicciones apuntan a un aumento de temperatura en todo el continente, sobre todo en la porción norte, junto a reducciones de la precipitación en la porción norte y centro-oeste, y un aumento de precipitación en la porción sur, asociadas a eventos extremos de lluvia. En la Península Ibérica, las recientes tendencias climáticas revelan un escenario más cálido y seco en comparación con las décadas pasadas. Las dos regiones, aunque distantes, están ligadas por teleconexiones donde la deforestación de la Amazonía puede afectar no sólo a las lluvias en la propia América del Sur, sino también en Europa, intensificando los efectos de los cambios climáticos.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 Solman S.A. Regional Climate Modeling over South America: A Review. *Advances in Meteorology* 2013: Article ID 504357 (2013).
- 2 Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B. et al. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14, 563–578 (2014).
- 3 Nepstad, D. *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science* 344,1118–1123 (2014).
- 4 Ribeiro, M. C. *et al.* Brazilian Atlantic forest: how much is left and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation* 142, 1141–1153 (2009).
- 5 Armesto, J. J., Arroyo M. T. K., & Hinojosa L. F. The Mediterranean Environment. En: T. T. Veblen, K. R. Young, and A. R. Orme (eds.) “The physical geography of South America”, Oxford University Press, pp. 184-199 (2007).
- 6 Magrin, G.O. *et al.* Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1499-1566 (2014).
- 7 CR2 Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). Informe a la Nación. *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro* (2015).
- 8 Latorre, C. *et al.* Late Quaternary environments and paleoclimate. En: T. Moreno & W. Gibbons (eds), “The Geology of Chile”, pp. 309-328. London Geological Society Press, London (2007).
- 9 Vicente-Serrano S.M. & Rodríguez-Camino, E. Observed atmospheric trends in the Iberian Peninsula. Pp 20-23 en: Special Issue on climate over the Iberian Peninsula: an overview of CLIVAR-Spain coordinated science. CLIVAR Exchanges nº 73. World Climate Research Programme (2017).
- 10 IPCC. Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multcapítulos. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Field, C.B. *et al* (eds) Organización Meteorológica Mundial, Ginebra (Suiza) (2014).
- 11 European Environment Agency. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016: an indicator-based report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. (2017)
- 12 Salazar, L. F., Nobre C. A. & Oyama, M.D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters* 34, L09708 (2007).
- 13 Zelazowski, P. *et al.* Changes in the potential distribution of humid tropical forests on a warmer planet. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 369, 137–160 (2011).
- 14 Lapola, D.M., Oyama, M.D. & Nobre, C.A. Exploring the range of climate biome projections for tropical South America: the role of CO₂ fertilization and seasonality. *Global Biogeochemical Cycles* 23, 1–16 (2009).
- 15 Malhi, Y. *et al.* Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change induced dieback of the Amazon rainforest. *Proceedings of the National Academy of Science* 106, 20610–20615 (2009).
- 16 Nobre, A.D. The Future Climate of Amazonia: Scientific Assessment Report. Sponsored by CCST-INPE, INPA and ARA. São José dos Campos, Brazil (2014).
- 17 Makarieva, A.M. & Gorshkov, V. G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1013–1033 (2007).
- 18 Marengo, J.A. *et al.* Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. *Journal of Climate* 17, 2261-2280 (2004).
- 19 Sampaio, G. *et al.* Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters* 34, L17709 (2007).
- 20 Lawrence, D. & Vandecar, K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Climate Change* 5, 27–36 (2014) .
- 21 Victor D.G. *et al.* Introductory Chapter. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2014).
- 22 Nepstad, D. *et al.* Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. *Forest Ecology and Management* 154, 395–407.
- 23 Laurance, W.F. & Williamson, G.B. Positive feedbacks among forest fragmentation, drought, and climate change in the Amazon. *Conservation Biology* 15, 1529–1535 (2001).
- 24 Coe, M.T. *et al.* Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south-southeastern Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 368, 20120155 (2013).

REFERENCIAS COMENTADAS

Vicente-Serrano S.M. & Rodríguez-Camino, E. **Observed atmospheric trends in the Iberian Peninsula.** Pp 20-23 en: **Special Issue on climate over the Iberian Peninsula: an overview of CLIVAR-Spain coordinated science. CLIVAR Exchanges n° 73. World Climate Research Programme (2017).**

Este estudio resume, el estado del arte respecto de las tendencias climáticas en España. Las conclusiones de este estudio son que hay un fuerte aumento de la radiación solar desde la década de 1980, pero no hay cambios notables en la velocidad del viento en la superficie. Por otro lado señala que se registró una fuerte disminución en la humedad relativa (-5% entre 1961 y 2011) y la existencia de una fuerte variabilidad espacial y estacional en las tendencias de precipitación, aunque la precipitación media anual en España mostró una disminución moderada en las últimas cinco décadas; la demanda evaporativa atmosférica aumentó en las últimas cinco décadas (+24.4 mm década⁻¹), principalmente en los meses de verano. En general, las recientes tendencias climáticas observadas en España sugieren claramente un escenario más cálido y seco en comparación con décadas pasadas. Este hallazgo es compatible con las observaciones en otras áreas del Mediterráneo, donde hay una tendencia hacia un escenario climático caracterizado por una menor disponibilidad de agua.

Solman S.A. **Regional Climate Modeling over South America: A Review. Advances in Meteorology 2013: Article ID 504357 (2013).**

Este estudio resume el progreso de las actividades de modelación climática regional en América del Sur desde los primeros esfuerzos a principios de la década de 2000 hasta ahora. Durante los últimos 10 años, se han realizado simulaciones con modelos climáticos regionales (MCR) para varios propósitos en la región. Los primeros esfuerzos se centraron principalmente en estudios de sensibilidad tanto para los mecanismos físicos como para los aspectos técnicos de los MCR. Los últimos avances se centraron principalmente en proporcionar información de alta resolución sobre el cambio climático regional. Este documento describe las contribuciones más sobresalientes de los MCR en el marco de la iniciativa CORDEX, que representa un gran esfuerzo para producir proyecciones de cambio climático conjunto a escalas regionales y permite explorar el rango asociado de incertidumbres. También se discuten los desafíos restantes en el modelado de las características climáticas de América del Sur.

Nepstad, D. *et al.* **Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. Science 344,1118–1123 (2014).**

Este estudio pone a prueba una serie de hipótesis para explicar la reciente disminución del 70% en la deforestación en la Amazonía brasileña lo que sugiere que es posible gestionar la deforestación asociada al avance de la frontera agrícola y ganadera. Este estudio concluye que los enfoques territoriales para disminuir la deforestación han sido efectivos y podrían eventualmente abatir la deforestación al tiempo que proporcionan un marco para abordar otras dimensiones importantes del desarrollo sostenible. El desafío ahora es construir sobre este progreso para construir una estrategia de desarrollo rural productivo y sostenible.

GLOSARIO

Aerosoles. Conjunto de partículas muy pequeñas, sólidas o líquidas, suspendidas en un gas. Los aerosoles presentes en la atmósfera terrestre, de origen natural o humano, pueden interferir directamente con la absorción y reflexión de la radiación solar, e indirectamente con la formación de núcleos de condensación de nubes. Las plantas producen aerosoles (volátiles) que auxilian en la formación de nubes de lluvia. La combustión del bosque a través de quemadas, usualmente antropogénicas, genera en contraste aerosoles que inhiben la formación de nubes de lluvia.

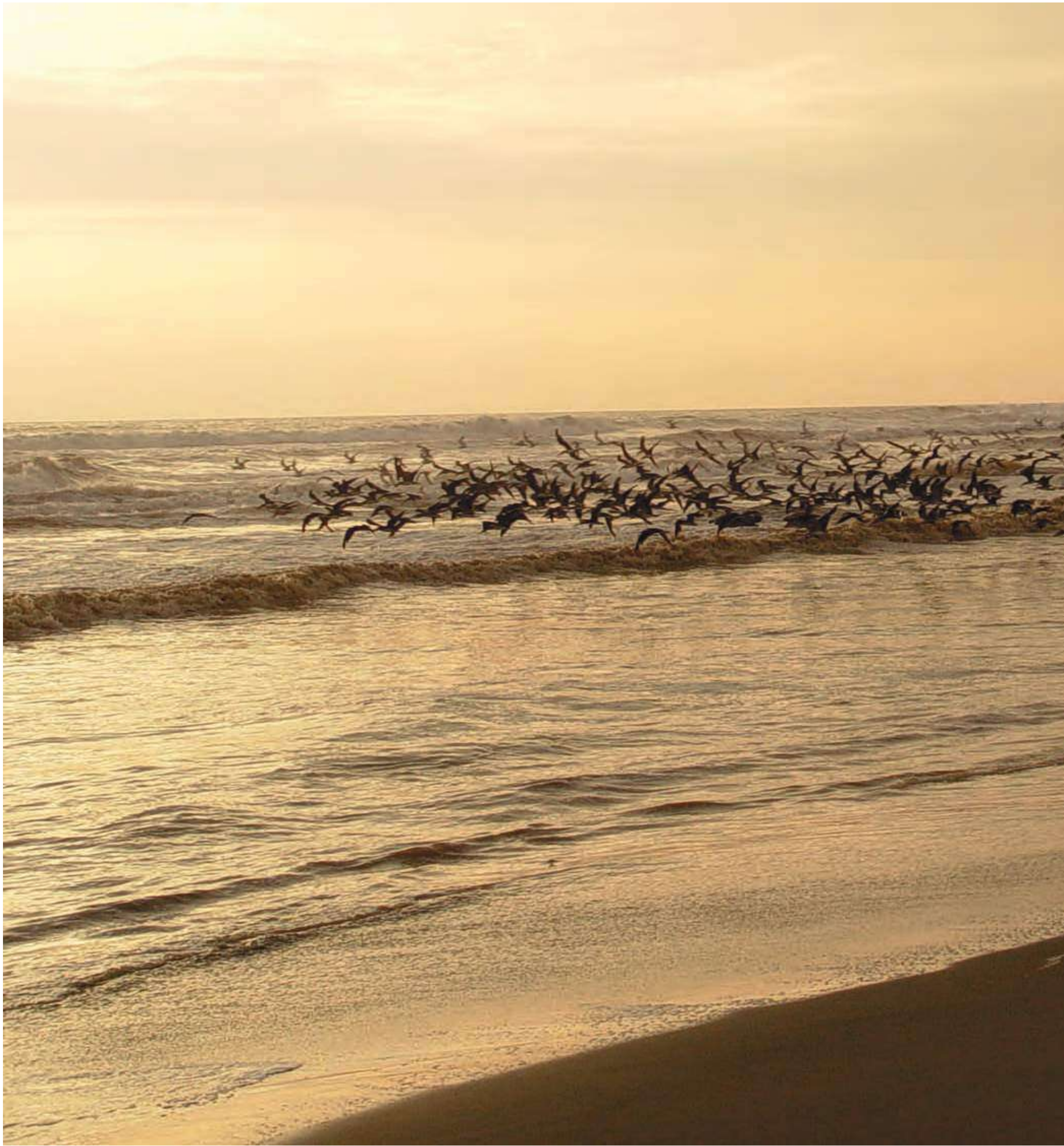
El Niño. Fenómeno atmosférico-oceánico donde hay un calentamiento anormal y enfriamiento de las aguas superficiales en la región tropical del Océano Pacífico, alterando el clima a escala regional y global. En América del Sur, el fenómeno de El Niño se caracteriza por intensas sequías en la Amazonía, eventos extremos de lluvia en el cono del sur del continente y fuerte reducción de la pesca oceánica en la costa del Perú.

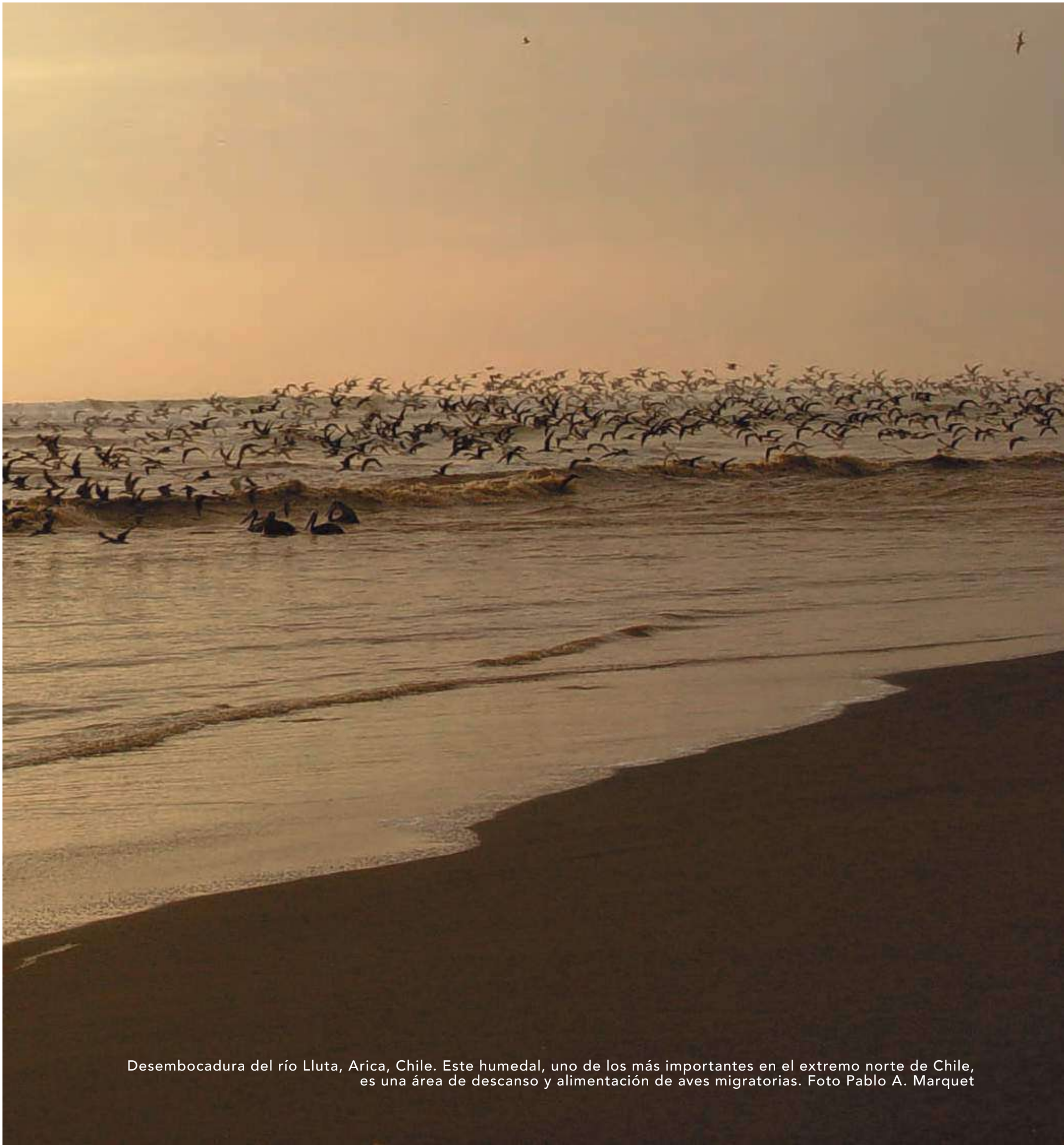
IPCC. Es un organismo científico creado por el Programa de las Naciones Unidas del Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), cuyos objetivos son, de acuerdo con su propio sitio web (1): “acceso y revisión de la última información técnica, científica y socioeconómica producida en el mundo, que es relevante para el entendimiento del cambio climático.” Por lo tanto, el IPCC no realiza ninguna investigación ni monitorea datos o parámetros relacionados con el clima. Su funcionamiento es conducido por millares de científicos del mundo que, voluntariamente, revisan el conocimiento producido sobre el asunto de manera completa y objetiva, emitiendo un informe colectivo. Los informes son producidos con el propósito de informar sobre los principales cambios del clima previstos y el grado de incertidumbre en cada una de las predicciones, los posibles impactos socioeconómicos y ambientales relacionados con estos cambios, y posibles medidas de adaptación y mitigación frente a los impactos.

Teleconexiones. Anomalías climáticas en regiones muy distantes, pero que están relacionadas entre sí, a través de la propagación de ondas y transporte de energía en las corrientes atmosféricas y oceánicas. Un ejemplo es el propio fenómeno El Niño, que afecta a regiones de América, Asia y Australia conectadas a través del Océano Pacífico.

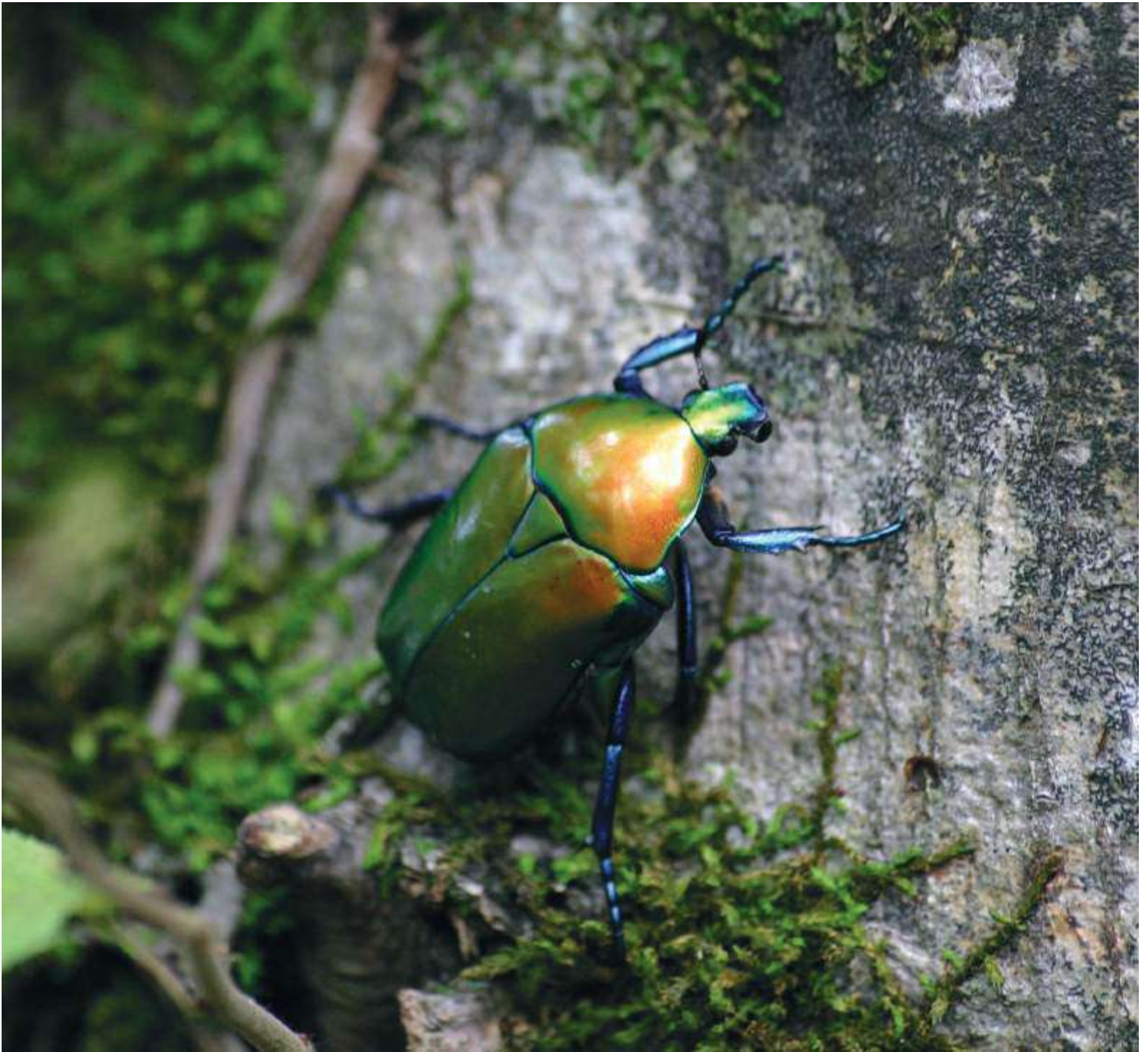
Un ejemplo dramático del retroceso glaciar asociado al cambio climático es el Glaciar de Monte Perdido, en los Pirineos Españoles. Las fotos fueron tomadas en los años 1910, 1981 y 2017. Fotos Ibai Rico y Juan I. López-Moreno (IPE-CSIC)







Desembocadura del río Lluta, Arica, Chile. Este humedal, uno de los más importantes en el extremo norte de Chile, es una área de descanso y alimentación de aves migratorias. Foto Pablo A. Marquet



Los escarabajos forman el grupo de organismos macroscópicos más diverso del planeta, sumando aproximadamente 400 mil especies

Pérdida de biodiversidad: causas y consecuencias para la humanidad

Vinicius F. Farjalla, Ricardo Coutinho, Lorena Gómez-Aparicio, Sergio A. Navarrete, Aliny P. F. Pires, Mário L. G. Soares, Anna Traveset y Mariana M. Vale

RESUMEN

La biodiversidad se refiere a todas las variaciones de las formas de vida en una determinada región. Se incluyen en el concepto de biodiversidad, además de la diversidad de especies, la diversidad genética, de formas, de atributos funcionales, de interacción entre especies e incluso de ecosistemas en una determinada área. Todas estas medidas de diversidad biológica tienen relación con variados aspectos del funcionamiento de los ecosistemas naturales que sostienen la vida en la tierra. El hombre, a través de diversas acciones, viene impactando severamente la biodiversidad del planeta. Aunque es muy difícil de medir con exactitud, todos los científicos coinciden en que la tasa actual de pérdida de especies por la acción humana es tan elevada, que el período actual en que vivimos ya es considerado como de extinción masiva de especies. Entre las principales causas de la pérdida de biodiversidad por la acción humana están la transformación en uso del suelo, el cambio climático, la fragmentación y degradación de los hábitats naturales, los cambios en los ciclos de los elementos en el planeta, la introducción de especies exóticas y la sobreexplotación de especies de valor comercial, especialmente en ambientes marinos. La pérdida de la diversidad, en cualquiera de sus formas, causa múltiples efectos en los ecosistemas, la mayoría de ellos perjudiciales para la humanidad a corto plazo, y todos ellos muy perjudiciales a largo plazo. Ciertamente, dependemos de la biodiversidad para una serie de productos, procesos y servicios ecosistémicos, tales como la provisión de alimentos y la regulación del clima. La existencia de severas crisis de gobernanza, asociadas a la fragilidad económica de diversos países, representan una amenaza adicional a la preservación y manejo de la diversidad en Iberoamérica, una de las regiones más diversas del planeta.

1. Panorama global y amenazas a la biodiversidad

De forma sencilla, podemos decir que la biodiversidad se refiere a la variabilidad total de la vida en una zona determinada, desde una región en particular a todo el planeta. Comúnmente, nos referimos a la diversidad de las especies, aunque el término incluye también toda la variedad de interacciones entre ellas. Además, podemos tratar la biodiversidad a diferentes escalas, desde la diversidad genética hasta la diversidad de sistemas en un paisaje. Podemos referirnos a los paisajes en un bioma o también a los **biomas** del planeta. El número de especies conocidas por la ciencia (sin considerar las especies fósiles) se estima en alrededor de 1,2 millones y esta cifra representa sólo cerca del 14% del total (~8,7 millones) de las especies existentes¹ y no incluye la diversidad bacteriana y de otros micro-organismos procariontes y eucariontes con los que convivimos estrechamente. También hay que tener en cuenta la enorme diversidad genética intraespecífica; en el caso de anfibios, reptiles y mamíferos, ésta puede representar alrededor del 25-30% de la variabilidad observada entre las **poblaciones**. Un ejemplo de la importancia de la variabilidad genética lo encontramos en las especies domesticadas. Como muestra, existen más de 800 razas de ovejas, las cuales se derivan de una única especie: *Ovis aries*.

A pesar de que algunos grupos de organismos –tales como mamíferos, aves, reptiles y plantas superiores– se consideran relativamente bien conocidos, la contribución

de otros grupos a la biodiversidad global sigue siendo prácticamente desconocida. Es el caso, por ejemplo, de los microorganismos en general. Además, hay algunos sistemas (por ejemplo, cimas de muchas montañas, el océano profundo) que están todavía poco explorados y, por tanto, siguen siendo poco conocidos. Se estima que hay cerca de cuatro veces más especies en el medio terrestre que en el medio marino, aunque este último ocupa alrededor del 70% de la superficie del planeta¹. Esto se atribuye en parte a que el medio marino es mucho menos explorado y conocido que el medio terrestre. Pero así mismo, existen más de 10 formas de vida enteramente distintas que ocurren exclusivamente en el mar y que no tienen parientes siquiera cercanos en los sistemas terrestres. Estos organismos incluyen una enorme diversidad de productores primarios, muchos químico-sintetizadores, y especies que juegan roles clave en la regulación del clima en el planeta, o aquellos que consumimos a gusto en muchos restaurantes del mundo (e.j. equinodermos, decápodos).

Los patrones de distribución de la biodiversidad de la mayoría de los grupos de organismos son también poco conocidos. Para la mayoría de los grupos terrestres, y también marinos, se observa, en general, un gradiente latitudinal de la biodiversidad, con una mayor diversidad en las regiones tropicales². Sin embargo, otros grupos muestran patrones distintos (ej. macroalgas), debido a que hay otras variables determinantes de la biodiversidad. Asimismo, existe un gradiente altitudinal de la biodiversidad, la cual suele disminuir con la altitud, aunque esto puede variar entre las distintas regiones del planeta². A pesar de la tendencia general de aumento de la biodiversidad hacia los trópicos y su descenso hacia las regiones más altas, las numerosas excepciones existentes y las incoherencias de algunos grupos taxonómicos instan a la precaución en la generalización de este modelo. En el medio marino también se observa una gran complejidad en la distribución de la biodiversidad, especialmente considerando la tridimensionalidad y diversidad de hábitats de ese entorno; así, encontramos especies de aguas poco profundas en la zona intermareal, donde los organismos están expuestos a condiciones aéreas durante la marea baja, y especies en los ambientes prácticamente

inexplorados de las trincheras abisales a profundidades de alrededor de 10.000 metros, sometidos a una fuerte presión y a la ausencia total de luz.

La complejidad observada en los patrones de distribución de la biodiversidad se deriva del hecho de que dicha distribución es el producto de una larga y siempre cambiante historia evolutiva, incluida la diversificación y procesos de extinción en un entorno complejo geográfica y ecológicamente y de su interacción con las condiciones naturales actuales. Sin embargo, es innegable el papel del ser humano en la distribución de muchas especies. En los últimos 11.000 años, desde los albores de la agricultura e incluso antes -cuando nuestros antepasados eran todavía sólo cazadores y recolectores-, la humanidad se ha venido apropiando, de forma creciente y continuada, de los recursos biológicos y de la productividad natural de la tierra y el mar, con el fin de sostener la expansión de las civilizaciones³. Todo lo que hemos conseguido como civilización se originó en los animales, en las plantas y en los ecosistemas de los que formamos parte.

Se estima que más de la mitad de la superficie habitable de la tierra ha sido significativamente alterada por la actividad humana. Hemos alterado la naturaleza y, por tanto, la biodiversidad de diferentes maneras: con la agricultura, silvicultura, pesca, sobreexplotación de las especies, destrucción, conversión, fragmentación y degradación de hábitats, introducción de especies exóticas, contaminación del suelo, agua y atmósfera, y modificando el clima (ver infografía). Sólo la fragmentación del hábitat es responsable de una reducción media de la biodiversidad de más del 10%, alcanzando pérdidas superiores al 70% en algunas regiones⁴. Todas estas formas de intervención tienen una causa común: el tamaño de la población humana y el sistema económico dominante, basado en el consumo exacerbado y traslado de estos recursos a escala global, lo que asociamos a calidad de vida y “desarrollo” humano, demandando, por un lado, la explotación local de recursos naturales de manera insostenible -incluidas las materias primas, energía y agua- y, por otro lado, lanzando una creciente variedad de desechos a los sistemas naturales (ver Capítulo 2).

“Cerca de 25.000 especies –del 30% de las especies bien estudiadas– están amenazadas por el cambio global causado por el hombre. Cerca del 40% de estas especies amenazadas habitan en Iberoamérica”

Debido a la pérdida de biodiversidad, la humanidad pierde una gran cantidad de bienes y servicios ecosistémicos (ver recuadro pág. 92). En otras palabras, sin el mantenimiento de la biodiversidad, la subsistencia, el refugio contra los agentes naturales, o la seguridad alimentaria se verían seriamente comprometidas, además de afectar directamente a la economía mundial, lo que podría comprometer el buen mantenimiento de toda la humanidad. A modo de ejemplo, a pesar de

Número de especies amenazadas por grupo taxonómico en los 22 países que componen Iberoamérica. Son consideradas especies amenazadas aquellas con status "Críticamente Amenazada", "Amenazada", o "Vulnerable", de acuerdo con la Lista Roja de Especies Amenazadas editada por la International Union for Conservation of Nature⁵.

País	Mamíferos	Aves	Reptiles*	Anfibios	Peces*	Moluscos*	Otros invertebrados*	Plantas*
Argentina	36	52	15	30	39	0	14	70
Bolivia	21	54	6	35	8	2	1	104
Brasil	83	169	29	36	86	22	33	532
Chile	19	34	7	27	25	1	12	72
Colombia	55	126	32	215	97	4	48	258
Costa Rica	11	24	12	61	61	1	30	140
Cuba	11	17	16	49	44	0	23	179
Ecuador	46	106	39	175	60	49	21	1.856
El Salvador	6	6	10	10	15	0	10	29
España	17	17	20	6	78	141	117	216
Guatemala	15	15	32	78	36	2	11	101
Honduras	7	12	40	56	42	0	21	123
México	95	64	97	219	180	8	98	401
Nicaragua	7	15	9	10	37	2	18	46
Panamá	17	23	10	49	54	0	22	208
Paraguay	10	27	3	0	0	0	0	19
Perú	54	121	15	111	50	4	4	326
Puerto Rico	2	9	14	14	30	0	0	57
Portugal	13	13	4	1	63	76	27	82
República Dominicana	6	15	44	32	29	0	16	42
Uruguay	10	22	5	5	40	0	2	22
Venezuela	35	51	18	73	43	1	25	82
TOTAL	576	992	477	1.292	1.117	313	553	4.965

* Indica grupos que no fueron completamente evaluados por la IUCN, por lo que su verdadero estado es desconocido. Las cifras relativas a estos grupos deben leerse como número de especies amenazadas en relación con las especies evaluadas, pero no en relación con el número total de especies en cada grupo.

los aparentemente altos costes para la agricultura y la explotación forestal resultantes de la reducción de la deforestación, se estima que si ésta se redujera, se generaría una ganancia anual de aproximadamente 200 mil millones de dólares⁶. Varios sectores, tales como la producción de alimentos, el suministro de agua potable y la producción de medicamentos, por nombrar algunos, dependen directamente de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. Sin embargo, aunque sabemos que los diferentes ecosistemas (y, por tanto, la biodiversidad relacionada con ellos) nos proporcionan diferentes bienes y servicios, todavía no conocemos, de forma objetiva, el papel real de la biodiversidad en el mantenimiento de los procesos ecológicos.

En las próximas secciones trataremos de forma más detallada las principales amenazas a la biodiversidad asociadas a las actividades humanas y las consecuencias de la pérdida de diversidad sobre la humanidad.

2. Causas de la pérdida de biodiversidad

2.1 Cambio climático

El cambio climático es posiblemente el componente del cambio global mejor estudiado hasta el momento, y hace referencia a los rápidos cambios acaecidos en el clima (temperatura, precipitación) en las últimas décadas atribuidos a la alteración de la composición atmosférica por la actividad humana (ver Capítulo 4 para cambios climáticos en Iberoamérica). Los impactos del cambio climático sobre la biodiversidad pueden operar a múltiples niveles de organización ecológica. Al nivel más básico de organización, el cambio climático podría disminuir la diversidad genética de **poblaciones** y especies debido a procesos de selección direccional y migración rápida⁷. Los distintos efectos sobre las **poblaciones** tendrán a su vez repercusiones sobre la red de interacciones inter-específicas a nivel de comunidad⁸. Así, para muchas especies los principales impactos del cambio climático no serán directos, sino indirectos a través de la asincronía con especies de las que dependen para alimentarse o

reproducirse. Finalmente, el cambio climático puede producir cambios a escala lo suficientemente grande como para afectar a **biomas** enteros. Por ejemplo, un análisis reciente de la distribución potencial futura de los **biomas** en Sudamérica indica que un importante porcentaje de la superficie de la selva amazónica podría ser reemplazado por sistemas más secos y menos productivos como las sabanas⁹.

Las especies pueden responder al cambio climático mediante tres estrategias no exclusivas: moviéndose en el espacio (ej. cambiando su área de distribución, ver Capítulo 13), moviéndose en el tiempo (ej. modificando su fenología) o cambiando su funcionamiento (ej. cambios fisiológicos o

de comportamiento). Existe amplia evidencia científica de recientes cambios altitudinales o latitudinales en las áreas de distribución de cientos de especies, particularmente en aquellas con buena capacidad de dispersión como aves, insectos o invertebrados marinos¹⁰. Para muchas especies estos cambios han implicado una contracción de sus áreas de distribución. Asimismo, se ha demostrado que la modificación de la fenología es una respuesta al cambio climático generalizada en especies terrestres y acuáticas de todos los niveles tróficos¹¹. Por ejemplo, las plantas en general han adelantado su floración en respuesta a la suavización de las temperaturas invernales y el adelanto de la primavera. Finalmente, las especies pueden adaptar su fisiología o comportamiento a las nuevas condiciones más

Los bienes y servicios que nos da la biodiversidad



Las abejas, entre otros tipos de insectos, cumplen una función clave en los ecosistemas como es la polinización de plantas. Este proceso es uno de los servicios ecosistémicos de provisión que obtenemos de los ecosistemas y que tienen una importancia clave en la productividad de los cultivos. Foto de Debivort. CC BY-SA 3.0

Los servicios ecosistémicos o ambientales pueden entenderse como cualquier producto o proceso del ecosistema que beneficia directa o indirectamente al hombre. Los servicios de los ecosistemas se clasifican en: servicios de provisión, de regulación, de apoyo y culturales. Los servicios de provisión se extraen directamente de los recursos de la Naturaleza, como por ejemplo, los productos naturales utilizados en la industria farmacéutica, la madera, el agua y los alimentos. Los servicios de regulación están relacionados con los efectos de las actividades de los organismos que generan beneficios directos para los seres humanos, tales como la purificación del agua, el control de la erosión del suelo, la captura de dióxido de carbono y la polinización. Los servicios de apoyo están relacionados con el mantenimiento de las condiciones necesarias para el funcionamiento de los ecosistemas y ayudan a promover otros servicios de los ecosistemas; por ejemplo, el ciclo de nutrientes, la variabilidad genética y la productividad primaria. Los servicios culturales, por otro lado, se centran en los aspectos sociales relacionados con la biodiversidad, tales como las actividades turísticas, la belleza estética y armonía del paisaje y el bienestar espiritual.

cálidas mediante mecanismos de **plasticidad fenotípica** o selección natural. Existen por tanto múltiples estrategias de responder y adaptarse al nuevo clima, la cuestión es si las especies serán capaces de hacerlo a la velocidad necesaria para contrarrestar la rapidez y magnitud de los actuales cambios climáticos, evitando así su extinción local o global.

Existe amplia evidencia científica de recientes cambios altitudinales o latitudinales en las áreas de distribución de cientos de especies, relacionados al cambio climático

Para proyectar los impactos esperados del cambio climático sobre la biodiversidad suelen usarse modelos ecológicos que tratan de predecir cambios en la distribución o en la abundancia de las especies. Los modelos que exploran cambios en distribución basados en datos de presencia/ausencia de especies “bioclimatic envelope models” han sido los más utilizados hasta el momento (ver Capítulo 13). Estos modelos usan la relación entre la distribución actual de las especies y el clima para definir el ‘nicho climático’ de cada especie. Dicho componente del nicho es luego proyectado para diferentes escenarios climáticos futuros con el objetivo de predecir la posible redistribución de las especies y los riesgos de extinción. Ciertamente, esta es una aproximación extremadamente simplificada de los determinantes de distribución de las especies, pero es una de las pocas herramientas que poseemos para anticipar impactos de cambio climático sobre las especies. Las extinciones son el último paso en la progresiva disminución de la abundancia de las especies, lo que ha llevado al desarrollo de nuevos modelos que intentan cuantificar el impacto de las actividades humanas sobre la abundancia de las especies usando índices como la Abundancia Media específica “Mean Species Abundance o MSA¹²”. Aunque existen grandes variaciones en sus predicciones, y hay mucha investigación todavía por desarrollar, la mayoría de los modelos de respuestas a cambio climático estiman consecuencias alarmantes para la biodiversidad, con los peores pronósticos indicando que estamos ante lo que podría ser la sexta extinción masiva en la historia de la tierra.

El cambio climático en los océanos toma muchas formas (ver Capítulos 7 y 12), incluyendo la temperatura superficial del mar, que seguramente producirá grandes cambios en la distribución geográfica de especies. La acidificación de los océanos, producto del aumento antropogénico en CO₂ atmosférico, y con ello la alteración del balance del flujo entre la atmósfera y la capa de mezcla del océano, puede tener consecuencias insospechadas sobre la diversidad marina, afectando, en primer lugar, a la gran diversidad de organismos marinos que necesitan de estructuras calcáreas para su subsistencia (ver Capítulo 12). Un ejemplo de la complejidad de los efectos del cambio climático sobre las comunidades y los ecosistemas se observa en la zona costera, donde los ecosistemas ubicados en la interfase entre ambientes terrestres y marinos, como los manglares, están sujetos a la interacción y sinergia de estos cambios. Dichos sistemas forestales son particulares debido a su dependencia del medio marino y a su ubicación en la costa y son especialmente sensibles a los cambios en los regímenes de temperatura y lluvia, así como en el nivel medio del mar, la temperatura del océano y la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales. Teniendo en cuenta la importancia de los manglares para el mantenimiento de la diversidad biológica y los recursos pesqueros en las zonas costeras tropicales, estos cambios podrían tener consecuencias socio-ambientales drásticas.

2.2. Pérdida y fragmentación de hábitats

La pérdida de hábitat sigue siendo hoy la principal causa de amenaza para la biodiversidad. La pérdida de hábitat se da por la eliminación de la cobertura vegetal natural para acomodar actividades humanas, como agricultura, minería y urbanización. En 1700, cerca del 5% del área continental del planeta se encontraba antropizada, es decir, totalmente dominada por las actividades humanas⁴. Hoy, ese número llega a más de la mitad del planeta y 1/5 más representan áreas en estado “semi-natural,” o sea, con alguna interferencia humana⁴. La magnitud de la antropización de nuestro planeta es tan grande, que las actividades humanas se han convertido en fuerzas geológicas significativas, justificando la definición de una nueva época geológica, llamada “antropoceno”¹³ (ver

Capítulo 1). El grado de amenaza que la pérdida de hábitat representa para la biodiversidad, sin embargo, depende no sólo de la cantidad de hábitat perdido, sino también del organismo en cuestión. Tomemos como ejemplo el Bosque Atlántico brasileño, un hotspot de biodiversidad (ver Glosario Capítulo 13) que retiene sólo el 12% de su cobertura forestal original¹⁴. Obviamente, algunos paisajes del Bosque Atlántico retienen una mayor proporción de bosque, sobre todo aquellos situados dentro de áreas protegidas, mientras que los paisajes en las inmediaciones de centros urbanos conservan una proporción menor. Un estudio demuestra que la integridad de las comunidades de diferentes grupos de animales se mantiene en paisajes con al menos 24 a 33% de cobertura de bosques¹⁵. Estos valores representan el umbral ecológico de los diferentes grupos de animales, con mayor grado de sensibilidad en anfibios, seguidos de aves y mamíferos¹⁵. Lo que se observa es que las comunidades en áreas por encima del umbral ecológico son dominadas por especies especialistas en hábitats forestales, generalmente endémicas del Bosque Atlántico, mientras que las comunidades en áreas bajo este umbral están dominadas por especies generalistas con amplia distribución geográfica. Por desgracia, la gran mayoría de los paisajes del Bosque Atlántico están por debajo del umbral ecológico de estos grupos de animales.

Los efectos negativos de la pérdida de hábitat son amplificados por la fragmentación de hábitat¹⁶, pues la cobertura vegetal remanente, en general, no se presenta en el paisaje en grandes bloques continuos, sino que se pulveriza en pequeños fragmentos de vegetación. Estos fragmentos están generalmente inmersos en una matriz de paisaje inhóspita, como plantaciones de eucalipto, caña de azúcar y pasto en el caso del Bosque Atlántico, que a menudo son impermeables muchas especies. Así, los organismos pueden quedar confinados en esas pequeñas “islas de vegetación”, donde no hay recursos suficientes para mantener **poblaciones** viables de animales de mediano y gran tamaño. Además, si la población dentro del fragmento está muy aislada, habrá reproducción entre individuos emparentados, aumentando la incidencia de problemas genéticos a lo largo del tiempo. Los fragmentos también están sujetos al llamado efecto de borde, es decir, a la influencia negativa de la matriz en el borde del

fragmento, incluyendo, por ejemplo: mayor incidencia de viento y radiación solar, penetración de **especies invasoras**, visitación de gatos y perros domésticos, los cuales son voraces depredadores de animales silvestres, o penetración de fuego utilizado como técnica de manejo agrícola. El borde del fragmento, por lo tanto, presenta una vegetación muy perturbada. Así, desde el interior de un fragmento forestal hacia el borde, se observa una sustitución de especies especialistas en hábitats forestales por especies generalistas. Si el fragmento es muy pequeño (<100 hectáreas, por ejemplo), posiblemente toda su vegetación estará bajo el efecto de borde. En el Bosque Atlántico, desgraciadamente, la vasta mayoría de los fragmentos forestales tiene menos de 50 hectáreas y está a menos de 100 m del borde¹⁴, teniendo, por lo tanto, poca relevancia para la conservación de la biodiversidad.

La pérdida de hábitat también afecta a los océanos y especialmente el océano y borde costero. El desplazamiento de la población humana desde el interior de los continentes hacia el borde costero es una tendencia mundial que se espera se acentuará aún más en las próximas décadas. Esta población humana impone una presión muy grande en el borde costero en la forma de contaminación, pero también por su demanda de infraestructuras de contención, comercio, vivienda y la recreación, lo que altera directamente el hábitat de organismos marinos. Esta transformación de hábitat, tradicionalmente considerados impactos locales en sistemas marinos, está adquiriendo cada vez una connotación global y debe estudiarse en más detalle sus impactos sobre la biodiversidad. Una de las transformaciones de hábitat más icónicas en el borde costero es la destrucción de los manglares. Los manglares se ubican en 124 países a lo largo de las costas tropicales, subtropicales y templadas cálidas. Los manglares son tremendamente valiosos para los sistemas marinos y la humanidad. A pesar de este conocimiento, los manglares se están perdiendo a una tasa global media del 1 al 2 por ciento anual, con pérdidas de hasta un 8 por ciento en algunos países. Entre el 20 y el 35% de los manglares ya se han perdido desde 1980, tasa que supera a las pérdidas de bosques tropicales o de arrecifes de coral. En algunas regiones, dichas pérdidas superan el 20% en un período de 25 años (1980-2005). Las principales presiones sobre



Muchos de los bosques del planeta han sido fragmentados debido al establecimiento de cultivos u otras actividades humanas como el bosque tropical de Costa Rica. Foto Rhett Butler, Mongabay.com

los manglares son la conversión del hábitat (incluyendo salinas) para la acuicultura de camarón y la agricultura, el desarrollo costero y urbano, la eliminación de desechos sólidos y la extracción de leña. De todas formas, las presiones que dan lugar a la pérdida de área y función de este tipo de ecosistema varían algo entre las regiones.

2.3 Cambios en los ciclos de los elementos químicos

Los ciclos biogeoquímicos son las vías por las cuales los elementos químicos se mueven por la biósfera, pasando por los reservorios rocosos, sedimentarios y gaseosos, además de por la biota (ver Capítulos 6 y 8). Entre los ciclos biogeoquímicos más relevantes desde el punto de vista humano, están los ciclos del carbono, nitrógeno y fósforo, ya que estos elementos son los principales constituyentes

de la biomasa de los organismos. Diversas actividades humanas están alterando estos ciclos, eliminando grandes cantidades de determinados elementos de los depósitos y lanzándolos en su forma reactiva (ver Glosario Capítulo 6) a los ecosistemas, siendo esto considerado uno de los principales impactos del hombre sobre el planeta¹⁷. Por ejemplo, aproximadamente 260 millones de toneladas de fosfato mineral fueron extraídos en 2016, 90% del cual se utilizó como fertilizante en agricultura¹⁸. La fijación artificial de nitrógeno elemental en amonio por el hombre también para uso en la agricultura representa actualmente cerca de la mitad de todo el nitrógeno fijado en los ecosistemas terrestres¹⁹. La quema de combustibles fósiles representa una movilización para la atmósfera de enormes cantidades de carbono y nitrógeno que se encuentran en rocas sedimentares, y que se ha demostrado que afecta al clima del planeta. Las citadas alteraciones en la disponibilidad de las formas reactivas de estos elementos

resultan en cambios en las características físico-químicas de los ecosistemas y en su disponibilidad para la biota, que causan, conjunta o aisladamente, severos impactos sobre la biodiversidad.

Diversas actividades humanas están alterando los ciclos de los elementos químicos, eliminando grandes cantidades de determinados elementos de los depósitos y lanzándolos a los ecosistemas, siendo esto considerado uno de los principales impactos del hombre sobre el planeta

Uno de los impactos más conocidos relacionados con alteraciones en los ciclos de los elementos es la eutrofización artificial (ver Glosario Capítulo 6) promovida por el hombre en ecosistemas naturales²⁰. Este fenómeno es particularmente común en cuerpos de agua interiores, como ríos y lagos, o costeros y cerrados, como bahías y estuarios, y es causado principalmente por el vertido de aguas residuales en estos ecosistemas. Las aguas residuales son ricas en nitrógeno y fósforo, elementos generalmente limitantes del crecimiento de algas microscópicas³ en los ecosistemas acuáticos. Al acceder a grandes cantidades de estos elementos, las algas crecen y se reproducen velozmente. A primera vista, el crecimiento de las algas podría causar un impacto positivo, ya que más energía podría fluir en las **redes tróficas**. La realidad, sin embargo, es otra. El crecimiento de estas algas no resulta en un crecimiento de los consumidores, ya que gran parte de las algas que se benefician con el gran aporte de nitrógeno y fósforo es impalatable o produce compuestos tóxicos para la biota. Con el crecimiento descontrolado de sólo unas pocas especies de algas, la interrupción del flujo de energía en las **redes tróficas** y la presencia de sustancias tóxicas en el agua, generalmente se ha demostrado una gran pérdida de diversidad en ecosistemas acuáticos eutrofizados. Este problema ya es global, aunque iniciativas en diversos países enfocadas a la reducción del aporte de aguas residuales a los ecosistemas acuáticos han mostrado ser valiosas y muchos ecosistemas acuáticos se

han recuperado, volviendo a condiciones próximas a las naturales. Sin embargo, en muchos países en desarrollo, la eutrofización sigue siendo un problema a combatir. Por ejemplo, en Brasil, gran parte de las bahías, como la Bahía de Guanabara, en el Estado de Río de Janeiro, lagunas y algunos importantes ríos, como el *Paraíba do Sul*, se encuentran en etapas críticas de eutrofización, por lo que la biodiversidad de estos ecosistemas está severamente amenazada.

Otro impacto, menos puntual y con mayores efectos sobre la biodiversidad global, es la deposición atmosférica de nitrógeno (ver Glosario Capítulo 6), proveniente de la quema de combustibles fósiles. Se estima que alrededor de 105 toneladas de nitrógeno se depositan al año en los ecosistemas terrestres y acuáticos, y las proyecciones para 2015 son de unas 200 toneladas²¹. En Iberoamérica, las mayores tasas de deposición atmosférica de nitrógeno se observan en dos áreas distintas: una zona ubicada en el sur de Brasil, Uruguay y noreste de Argentina y otra en el norte de Colombia y Venezuela. La Península Ibérica también presenta altas tasas de deposición pero son comparativamente bajas en relación al resto de Europa y las áreas arriba citadas²¹. En los ecosistemas terrestres, la deposición de nitrógeno causa la pérdida y sustitución de especies vegetales adaptadas a bajas condiciones de nutrientes disponibles en el suelo por especies adaptadas a condiciones más ricas de nutrientes. El porcentaje de pérdida de especies en sistemas con altas tasas de deposición alcanza valores cercanos al 25% en relación a los sistemas con bajas tasas de deposición²². En los ecosistemas acuáticos, la deposición de nitrógeno causa la acidificación de estos ecosistemas, con la consiguiente alteración de la comunidad, favoreciendo a las especies más adaptadas a condiciones ácidas del medio²³.

2.4 Invasión/introducción de especies exóticas

La introducción, establecimiento y expansión de **especies exóticas** en sistemas fuera de su área de distribución natural es considerada una de las principales causas de

pérdida de biodiversidad a escala tanto regional como global²⁴. Así, la presencia de una especie invasora en una comunidad es generalmente asociada con una menor riqueza de especies nativas que la observada en comunidades no invadidas. Los impactos de las **especies invasoras** sobre la biodiversidad son altamente dependientes tanto de las características de las especies invasoras como del sistema invadido. Por ejemplo, se ha demostrado que las especies de animales exóticos suelen tener mayores impactos sobre la diversidad y causar un mayor número de extinciones que las especies de plantas exóticas²⁵. Asimismo, la biodiversidad de los sistemas insulares es mucho más vulnerable al impacto de las invasiones que la de los sistemas continentales²⁶.

Los efectos de las **especies invasoras** sobre la biodiversidad pueden ser causados por competencia entre especies dentro de un mismo nivel trófico, o por interacciones entre especies de distintos niveles tróficos (ver Capítulo 12). Dentro de un mismo nivel trófico, uno de los principales riesgos para la biodiversidad es la hibridación entre especies nativas y exóticas emparentadas. Los híbridos resultantes suelen tener peor funcionamiento que los individuos nativos o incluso ser infértiles, conllevando a la larga un declive de las **poblaciones** de la especie. La competencia por los recursos dentro de un mismo nivel trófico (e.g. competencia entre plantas por el agua) también puede constituir un importante mecanismo de desplazamiento de las especies nativas por **especies invasoras**.

Las **especies invasoras** pueden afectar a la biodiversidad de otros niveles tróficos fundamentalmente (aunque no de forma exclusiva) mediante mecanismos de consumo. Por ejemplo, los vertebrados exóticos herbívoros pueden disminuir enormemente la biomasa y diversidad de comunidades de plantas nativas, como se ha visto con la introducción del conejo europeo (*Oryctolagus cuniculus*) y el ganado doméstico en el matorral mediterráneo de Chile y Australia²⁷. A su vez, la introducción en islas de vertebrados carnívoros como gatos (*Felis catus*) y ratas (*Ratus spp.*) ha causado la extinción de múltiples especies de pájaros y reptiles (muchos de ellos endémicos) al

alimentarse de sus crías. Finalmente, las **especies exóticas** pueden llegar a un nuevo sistema con sus parásitos y patógenos, causando estragos en la flora nativa sin una historia de coevolución con estos organismos causantes de enfermedades. Un ejemplo de la capacidad destructiva que pueden tener los microorganismos exóticos lo constituye el oomiceto del suelo *Phytophthora cinnamomi*, que ha causado la muerte de miles de eucaliptos (*Eucalyptus marginata*) en Australia y de encinas (*Quercus ilex*) y alcornoques (*Quercus suber*) en los bosques y dehesas de la cuenca Mediterránea²⁸.

Más allá de sus efectos sobre especies nativas concretas, las especies invasoras pueden tener efectos a escala de todo el ecosistema cuando alteran los procesos biogeoquímicos, hidrológicos y/o geomorfológicos de su entorno, actuando como “ingenieros del ecosistema”. Por ejemplo, el castor americano (*Castor canadensis*) modifica los bosques riparios de *Nothofagus* del sur de Chile transformándolos en sistemas abiertos sin regeneración arbórea²⁹. En sistemas dunares, la introducción de árboles exóticos fijadores de nitrógeno (*Acacia spp.*) ha causado un enorme incremento en la concentración de nutrientes del suelo, la estabilización de las dunas y un descenso en la diversidad de plantas nativas. Estos cambios a escala de ecosistema son más probables cuando las **especies invasoras** difieren radicalmente en sus rasgos funcionales con las especies nativas, y particularmente si dichos rasgos son claves para el funcionamiento de los ciclos biogeoquímicos. Finalmente, las **especies invasoras** pueden conllevar perjuicios directos a muchas actividades económicas. Por ejemplo, el mejillón dorado (*Limnoperna fortunei*), introducido en ríos brasileños a través del agua de lastre de buques, coloniza las turbinas de importantes centrales hidroeléctricas, incluyendo Itaipu Binacional, interrumpiendo las rutinas de trabajo de limpieza de filtros, turbinas y puntos de enfriamiento de agua.

2.5. Sobreexplotación de especies

La sobreexplotación de especies para el consumo humano es otro impacto importante sobre la biodiversidad,



Derechos Reservados bajo Creative Commons CC0

principalmente en la de Iberoamérica. Gran parte de la población mundial vive en las zonas costeras y depende de la pesca como fuente de alimento (ver Capítulos 2 y 11). La sobrepesca es el principal ejemplo de explotación de las especies, siendo una de las principales causas de la pérdida de diversidad en los océanos. Las especies más directamente afectadas son las de gran tamaño y mayor longevidad. Si, por un lado, estas especies poseen mayor valor económico, lo que justifica su explotación exacerbada, por otro lado, son las que presentan **poblaciones** más pequeñas y tasas de renovación más lentas, siendo por tanto las más susceptibles a la extinción³⁰. Debido a que la disminución de las **poblaciones** de las especies de gran porte ha conducido a la extinción local de determinadas

especies, las actividades pesqueras se realizan en áreas cada vez más profundas y están orientadas hacia especies cada vez menores y más próximas a la base de las **redes** tróficas, lo cual causa impactos todavía más profundos en la estructura y el funcionamiento del ecosistema marino³¹. Además del declive poblacional y de la pérdida de las especies sobreexplotadas (ver Glosario Cap-itulo 11), la pesca tiene efectos indirectos sobre muchas otras especies causando nuevas extinciones. Por ejemplo, algunas técnicas o artes de pesca, como el arrastre de fondo, impactan severamente sobre determinados hábitats marinos, en especial, los fondos fangosos, resultando en la pérdida indirecta e involuntaria de otras especies asociadas a estos ambientes³². La pesca también modifica las **redes** tróficas

marinas causando un declive adicional en la diversidad, y se piensa que la resistencia a perturbaciones y la resiliencia de muchos ecosistemas marinos fuertemente explotados por el hombre puede estar ya muy cerca de colapsar.

Los datos referentes a la pesca son alarmantes. Por ejemplo, en un análisis reciente, se verificó que el estado medio de los 'stocks' globales anuales de los peces ya es bastante bajo y está en declive³³. De 4.714 pesquerías evaluadas en 2012, sólo 32% de ellas estuvieron por encima del objetivo de biomasa que soporta el rendimiento máximo sostenible (ver Glosario Capítulo 11), mientras que 68% estuvieron por debajo de ese umbral crítico. Aún más preocupante es la constatación de que sólo el 35% de los stocks son pescados en un nivel que permite su recuperación. Esto significa que la mayoría de los stocks sobreexplotados experimentan un agotamiento adicional al escenario que se presenta actualmente. Basándose en datos semejantes, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, ver Glosario Capítulo 2) ha estimado que 29% de las actividades pesqueras está sobreexplotada o ya colapsadas (ver Glosario Capítulo 11)³⁴.

Hay un consenso de que el futuro de la pesca es preocupante y, a menos que una reforma integral de un enfoque unificador para la gestión global de las pesquerías, este escenario se agravará todavía más. Por ejemplo, se prevé que con la gestión actual, el 88% de los stocks estarían sobreexplotados en el año 2050. Una gestión y reconstrucción global de la pesca está presente en el Convenio sobre la Diversidad Biológica (ver recuadro pág.101), y varios países firmantes hicieron esfuerzos para contener la sobrepesca a través de modificaciones de la legislación y reducción de estímulos indeseados. Desgraciadamente, estos esfuerzos a veces desplazaron la presión de la pesca hacia los países en desarrollo y/o hacia el mar, donde el lado oscuro de las capturas ilegales, no reguladas y no declaradas, sigue siendo grande³⁵. Entre otras innovaciones, los avances recientes en el monitoreo por satélite de embarcaciones de pesca ofrecen esperanza de que estas prácticas perjudiciales puedan ser abolidas en breve. En el frente político, las

Naciones Unidas están trabajando para un nuevo acuerdo para proteger mejor la biodiversidad marina, los recursos alimenticios vitales y la captura en alta mar. Sin duda, se puede hacer mucho para evitar un colapso mundial de la pesca, principalmente teniendo en cuenta los resultados de las recientes investigaciones, que proporcionan una advertencia oportuna para implementar las reformas necesarias a escala global.

3. Impactos de la pérdida de diversidad sobre productos, procesos y servicios ecosistémicos

Las consecuencias del cambio global sobre la biodiversidad no se limitan a los cambios en la estructura de la diversidad biológica y a la distribución de las especies, si no que tienen efectos directos sobre la humanidad. La biodiversidad es en gran parte responsable de mantener el bienestar del hombre a través de los productos que ofrece, además de ser capaz de regular los procesos clave para el mantenimiento de nuestra vida en la tierra. Por lo tanto, la actual pérdida de especies reduce la capacidad de la diversidad biológica para proporcionar lo que llamamos "servicios ecosistémicos". Los servicios ecosistémicos o ambientales pueden entenderse como cualquier producto o proceso de los ecosistemas que beneficia directa o indirectamente al hombre. Por ejemplo, todos los días usamos un número de compuestos químicos que llamamos "productos naturales", descubiertos a partir de estudios con diferentes especies que co-habitan en nuestro planeta. La penicilina, el primer antibiótico producido por el hombre y que revolucionó el mundo de la medicina, se descubrió por Alexander Fleming a partir de estudios con el hongo *Penicillium*, que impedía el crecimiento de bacterias en medios de cultivo.

Los servicios de los ecosistemas son fundamentales para el mantenimiento del hombre en el planeta; sin embargo, el efecto real de la pérdida de la biodiversidad sobre estos servicios sigue siendo objeto de debate, aunque ha ganado importancia en las últimas dos décadas debido al establecimiento del Convenio sobre la Diversidad Biológica

en 1992. Desde entonces, los servicios ecosistémicos se han utilizado como base para apoyar las iniciativas destinadas a la conservación de la biodiversidad en un mundo regido por el capital. Los problemas que plantea la apropiación de este término todavía se discuten, pero su existencia es innegable: la humanidad necesita la Naturaleza.

Se proponen diversos mecanismos para explicar cómo la biodiversidad regula los servicios de los ecosistemas, pero, en general, los efectos de la diversidad están vinculados a la seguridad en el suministro y regulación de un servicio ambiental particular. Cuanto mayor es el número de especies en un área, menor será la probabilidad de que toda la comunidad se vea afectada por un cambio ambiental, y así el servicio en cuestión puede mantenerse. Por otra parte, diferentes especies tienen diferentes habilidades o atributos, lo que se llama diversidad funcional. Esto hace que se puedan complementar sus acciones, potenciando los procesos y servicios ecosistémicos realizados por ellas, tales como la producción primaria, la captura de dióxido de carbono, la purificación del agua para uso humano, el reciclaje de nutrientes en el suelo, e incluso la producción de alimentos. Muchas investigaciones científicas, varias de ellas usando métodos experimentales, han demostrado el rol de la diversidad en funciones ecosistémicas. Por ejemplo, la técnica de la rotación de cultivos, que prevé una alternancia de especies de cultivo (por ejemplo, maíz, frijol y soja) en un área determinada con el fin de no sobrecargar determinado extracto de suelo, utiliza el principio de uso complementario de estas especies para mejorar y asegurar la producción de alimentos a largo plazo. Se estima que la deforestación de los bosques tropicales para favorecer los cultivos y pastos y para la producción de biocombustibles será un importante contribuyente a la pérdida masiva de biodiversidad en el planeta³⁶. Estos efectos positivos de la diversidad no son especulaciones. Estudios recientes muestran que el efecto de los cambios en la diversidad de especies sobre la productividad primaria y las tasas de descomposición de materia orgánica son tan grandes o más grandes que aquellos producidos por cambios en las condiciones ambientales producidas por otros agentes de cambio global³⁷. En los océanos, la sobreexplotación

puede poner en peligro la pesca y afectar así al suministro de alimentos en muchos países. Entre los casos más destacados encontramos la explotación de la pesca de la costa chilena; gran parte de las pesquerías reguladas de todo el país están en estado de sobreexplotación o **colapsadas**³⁸. Estudios recientes muestran que, a nivel mundial, la diversidad de especies de peces costeros, así como su diversidad funcional, favorecen muy significativamente la biomasa total de peces, una de las principales fuentes de alimentación en muchas regiones del mundo³⁹. Además, estos estudios muestran que una mayor diversidad local de especies permite una mayor resistencia a fluctuaciones climáticas³⁹. Uno puede especular que las funciones ecosistémicas de comunidades ricas en especies podrían verse, inicialmente, menos afectadas por cambio climático que aquellas en comunidades más pobres en especies. Pero por encima de ciertos niveles de perturbación, las funciones de estos dos tipos de comunidades pueden colapsar irreversiblemente.

En cuanto a la prestación de servicios de los ecosistemas, América del Sur recibe un gran protagonismo en el escenario mundial. Este continente exporta alimentos y productos básicos a diversos países, ya que alberga uno de los más altos índices de diversidad del planeta, lo que, a su vez, se ve directamente afectado por los cambios globales. Situada en el continente sudamericano, la Amazonía despierta especial interés en diversos sectores de la sociedad debido a su papel en el mantenimiento de la vida en el planeta. Por ejemplo, de acuerdo con el Sistema Forestal de Brasil, la Amazonía brasileña aloja un total de 68.571 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono, de las cuales más de la mitad está retenida en la biomasa vegetal, lo que significa más de 84 millones de m³ de madera⁴⁰. Es por ello que la pérdida de los bosques tropicales es uno de los principales impulsores del aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. A escala regional, la Amazonía desempeña un papel clave en el ciclo hidrológico de gran parte de América del Sur a través de los llamados “**ríos voladores**.” El vapor de agua generado por el bosque regula la precipitación en diferentes regiones del continente, lo que garantiza el agua necesaria para

EL CONVENIO SOBRE LA BIODIVERSIDAD BIOLÓGICA



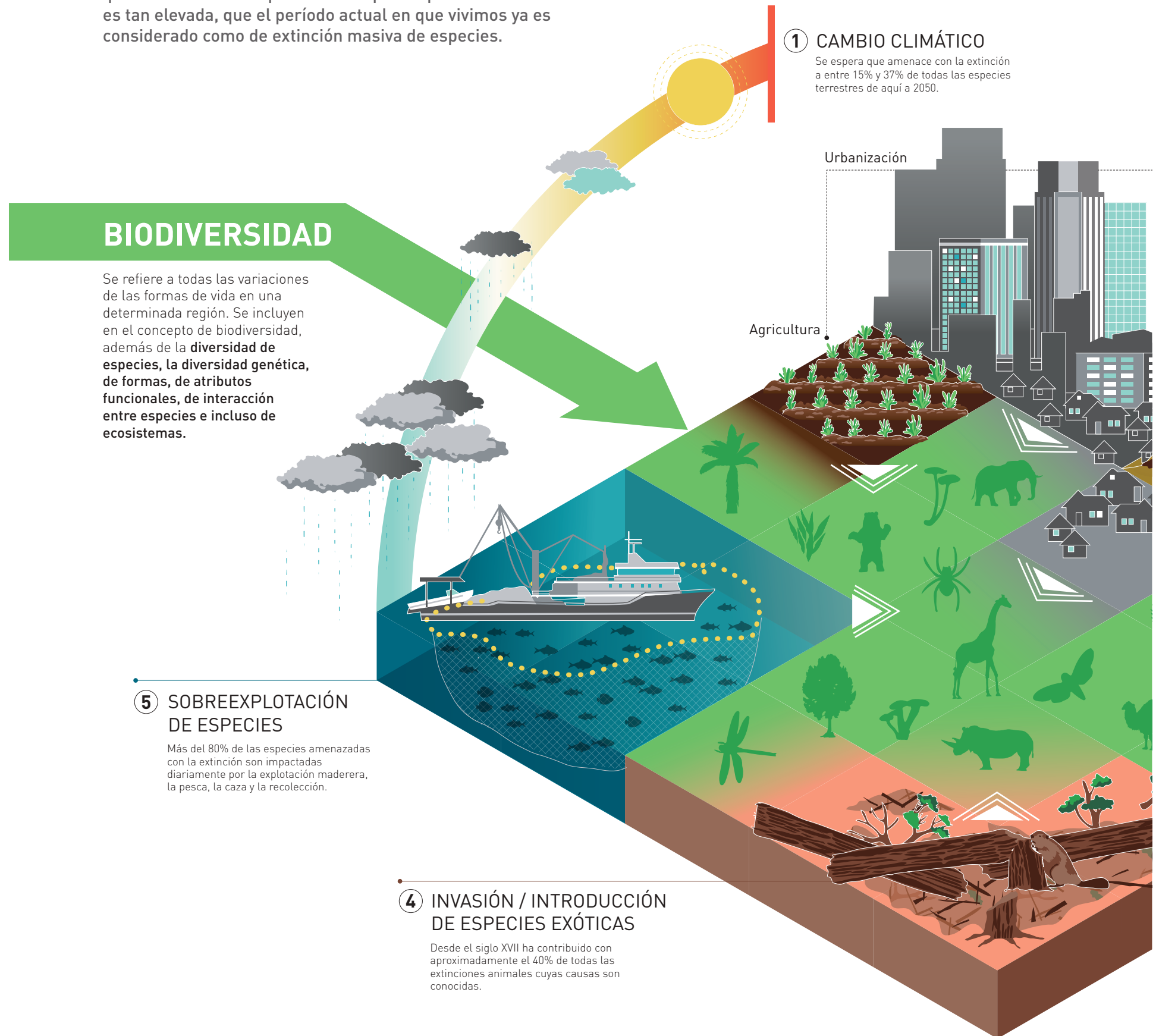
En torno al 25% de todas las especies conocidas del planeta están en los océanos. Foto CC0 - Universal

El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) es un acuerdo internacional firmado por 169 países y aceptado por otros 29 países no signatarios enfocados en la protección y uso de la biodiversidad. Sólo Estados Unidos ha firmado pero aún no lo han ratificado. Sus principales objetivos son: (1) la conservación de la diversidad biológica, (2) su uso sostenible, y (3) la distribución justa y equitativa de los beneficios derivados de los recursos genéticos, a través de un acceso adecuado y la transferencia de tecnologías resultantes de tales recursos, respetando siempre la soberanía de cada nación sobre el

patrimonio existente en su territorio. En términos generales, el CDB es un acuerdo que sirve de base y direccionador para otras convenciones y acuerdos ambientales, como el Protocolo de Cartagena sobre Bioseguridad, el Protocolo de Nagoya sobre el acceso y uso del Patrimonio Genético, los Principios de Addis Abeba para la Utilización Sostenible de la Biodiversidad y las Directrices para la Prevención, Control y Erradicación de las Especies Exóticas Invasoras. Para más información sobre el CDB, visite la página <https://www.cbd.int/>

CAUSAS DE LA PÉRDIDA DE BIODIVERSIDAD

El hombre, a través de diversas acciones, viene impactando severamente la biodiversidad del planeta. Aunque es muy difícil de medir con exactitud, todos los científicos coinciden en que la tasa actual de pérdida de especies por la acción humana es tan elevada, que el período actual en que vivimos ya es considerado como de extinción masiva de especies.



2 PÉRDIDA Y FRAGMENTACIÓN DE HÁBITATS

La biodiversidad fue reducida, en promedio, en 13,6% y la abundancia de las especies en 10,7%, en función de la pérdida y fragmentación de los hábitats. En algunas localidades, tales pérdidas pueden llegar a 76,5% y 39,5%, respectivamente.

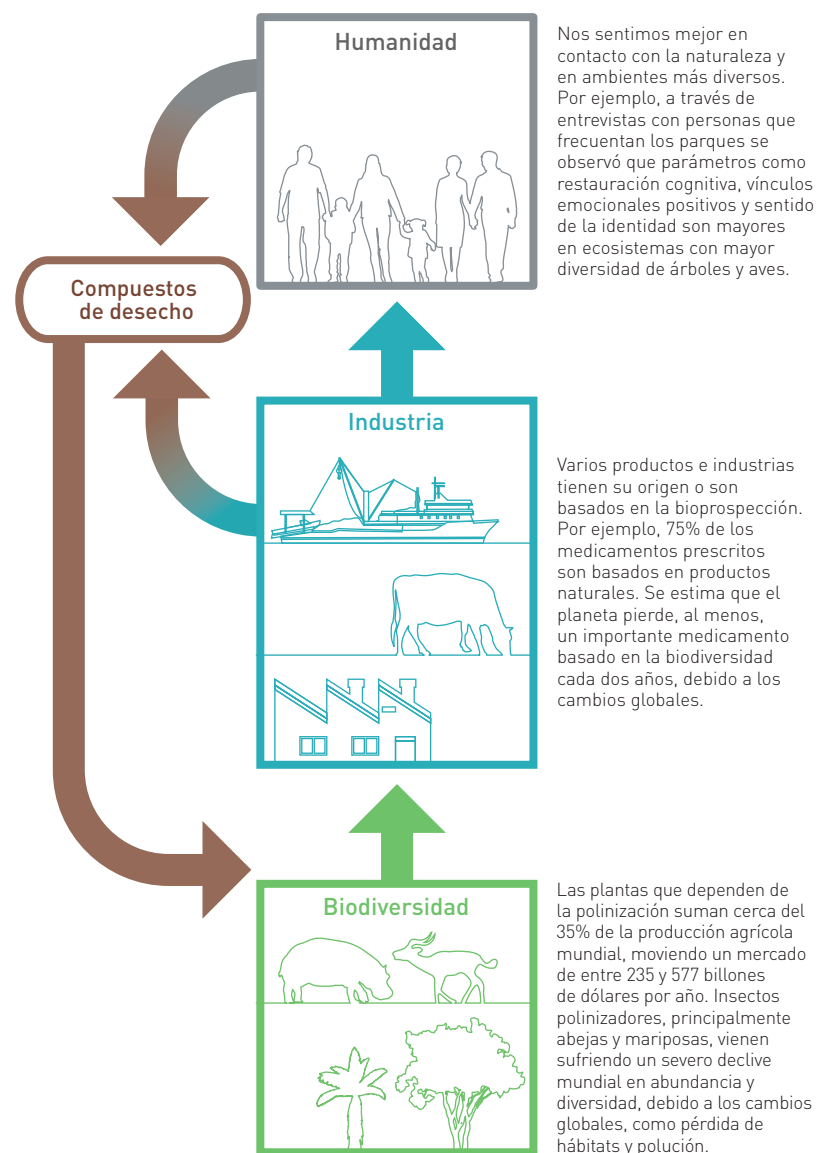
Minería

3 CAMBIOS EN CICLOS DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS

La deposición atmosférica de nitrógeno en los ecosistemas totaliza 105 teragramos por año. Las tasas de pérdida de especies aumentan linealmente con el aumento de las tasas de deposición.

CONSECUENCIAS DE LA PÉRDIDA DE LA BIODIVERSIDAD

La pérdida de la biodiversidad trae serias consecuencias para los ecosistemas y para la humanidad.



La biodiversidad terrestre representa un importante stock de carbono. Por ejemplo, cada hectárea de la Mata Atlántica, en el litoral brasileño, almacena cerca de 105 toneladas de carbono. Considerando una tasa de deforestación anual de 18.433 ha (2014-2015), son emitidos, por año, cerca de 2 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera.

el consumo humano, la agricultura, la ganadería y la electricidad en algunas de las zonas más productivas y pobladas del continente. A escala local, la fragmentación y pérdida de áreas forestales afectan directamente a los servicios ambientales relacionados con la regulación del clima local, el ciclo del agua y el mantenimiento del suelo. También se sabe que la extracción de las nueces de Brasil, uno de los principales productos naturales extraídos de la selva amazónica y símbolo de la región, depende del bosque preservado, debido a las múltiples interacciones biológicas que el castaño tiene con los animales polinizadores y dispersores de semillas⁴¹. Como se menciona en el Capítulo 11, la producción pesquera de Latinoamérica, proveniente primariamente de Perú y Chile, llegó a contribuir hasta el 40% de los desembarques de peces de todo el mundo.

En cuanto a los servicios culturales, la biodiversidad también juega un papel clave. Numerosas poblaciones locales dependen fuertemente del mantenimiento de las actividades relacionadas con la extracción de productos naturales. Los diversos pueblos indígenas de América del Sur tienen como subsistencia el uso de los productos extraídos directamente de la naturaleza. Sobre la base de las actividades culturales de los indígenas, cerca del 23% del territorio brasileño del Amazonas se considera tierra indígena, lo que contribuye al mantenimiento de los bosques y de los servicios que éste presta. Además, el ecoturismo o el turismo movido por la belleza natural es la principal actividad económica en varias ciudades en el mundo. Según la Organización Mundial del Turismo, el ecoturismo crece tres veces más que el turismo convencional. En Brasil, este turismo es uno de los principales impulsores de la economía del país. Según algunas investigaciones del Ministerio de Turismo de Brasil en 2012, el 21% de los turistas extranjeros eligen el país en función de las opciones de ecoturismo que ofrece.

Asignar un valor a la biodiversidad no es algo sencillo, porque gran parte de la biodiversidad aún no se ha descrito o es totalmente desconocida para el hombre. Pero también porque la diversidad no tiene un valor monetario en los mercados formales o informales. Éste es quizás uno de los principales retos del reconocimiento de la relación entre la biodiversidad

y los servicios ecosistémicos. Por ejemplo, a pesar de una amplia investigación sobre la flora de los ecosistemas terrestres, se estima que sólo el 6% de las 300.000 especies de plantas superiores (algunas estimas giran alrededor de 500.000 especies) han sido estudiadas sistemáticamente para conocer su potencial farmacológico, y sólo el 15% han sido descritas desde un punto de vista químico⁴². El potencial del medio marino como proveedor de nuevos fármacos se mantiene prácticamente sin explotar.

Por otra parte, se considera que el uso del argumento utilitario asociado con el concepto de servicios ecosistémicos como base para la conservación de la biodiversidad puede ser contradictorio. Un ejemplo evidente de esta contradicción es el uso de terrenos necesarios para la expansión agrícola y el consiguiente aumento de la oferta de alimentos, lo que conduce a la pérdida de zonas boscosas responsables del mantenimiento de la biodiversidad y del secuestro de carbono en las zonas limítrofes de la Amazonía brasileña⁴³. Por lo tanto, el uso de este argumento debe basarse en las estrategias concretas de gestión, con el fin de maximizar las áreas ya comprometidas para las actividades humanas. El aumento de la productividad en las tierras ya cultivadas, pero poco productivas, es una buena estrategia para la conservación de áreas de vegetación nativa, incorporando la priorización de áreas para la restauración y mecanismos financieros, como el pago por servicios ambientales a los pequeños agricultores⁴⁴. Esta salida también contribuye al fortalecimiento de los sectores más pobres de la población, que a menudo son los más afectados por la pérdida de los servicios ecosistémicos asociados a la pérdida de la diversidad biológica.

Sin duda, el reconocimiento del papel de la biodiversidad para garantizar el mantenimiento y el bienestar humano en el planeta sobre la base de servicios de los ecosistemas es un elemento clave para la elaboración y el cumplimiento de las iniciativas que garanticen la conservación de la biodiversidad. Cabe señalar, sin embargo, la importancia de establecer mecanismos apropiados para satisfacer los múltiples intereses que conforman la relación hombre-naturaleza, sin olvidar los valores éticos y morales que justifican la conservación de la biodiversidad.

4. Conclusiones

En este capítulo mostramos cómo el ser humano, a través de sus actividades, ha afectado a la biodiversidad global. También mostramos cómo la pérdida de biodiversidad puede afectar a la humanidad misma, ya que dependemos de los beneficios de la naturaleza para nuestra propia supervivencia. A pesar de algunas importantes lagunas en el conocimiento sobre la biodiversidad, se estima que la pérdida de biodiversidad ya ha superado el límite de seguridad en la prestación de servicios de los ecosistemas para la humanidad¹⁷, por lo que ya hemos atravesado los umbrales del mantenimiento de nuestras necesidades en relación con los beneficios de la naturaleza. En este sentido, hay que cambiar urgentemente el paradigma antropocéntrico actual de exclusión del hombre de la naturaleza y volver a entendernos a nosotros mismos como parte de ella, en la búsqueda de un modelo económico ambiental y socialmente más justo, que garantice las condiciones mínimas necesarias para el mantenimiento actual y futuro de la comunidad mundial.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 Mora, C. *et al.* How many species are there on Earth and in the ocean? *PLoS Biology* 9(8): e1001127 (2011).
- 2 Gaston K. J. *et al.* Global patterns in biodiversity. *Nature* 405, 220-227 (2000).
- 3 Krausmann, F. *et al.* Global human appropriation of net primary production doubled in the 20th century. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110: 10324-10329 (2013).
- 4 Ellis, E. C. *et al.* Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography* 19, 589-606 (2010).
- 5 IUCN 2017. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2017-1. Downloaded on 12 May (2017).
- 6 Tropical Forest Alliance 2020. World Economic Forum. Annual Report 2015-16 (2016).
- 7 Pauls, S. U., Nowak, C. Bálint, M. & Pfenninger, M. The impact of global climate change on genetic diversity within populations and species. *Molecular Ecology* 22, 925-946 (2013).
- 8 Valiente-Banuet, A. *et al.* Beyond species loss: the extinction of ecological interactions in a changing world. *Functional Ecology* 29, 299-307 (2014).
- 9 Lapola, D. M., Oyama, M. D. & Nobre C. A. Exploring the range of climate biome projections for tropical South America: the role of CO₂ fertilization and seasonality. *Global Biogeochemical Cycles* 23, 1-6 (2009).
- 10 Parmesan, C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 37, 637-669 (2006).
- 11 Thackeray, S. J. *et al.* Phenological sensitivity to climate across taxa and trophic levels. *Nature* 535, 241-245 (2016).
- 12 Alkemade, R. *et al.* GLOBIO3: A framework to investigate options for reducing global terrestrial biodiversity loss. *Ecosystems* 12, 374-390 (2009).
- 13 Crutzen, P. J. Geology of mankind: the anthropocene. *Nature* 415, 23 (2002).
- 14 Ribeiro, M. C. *et al.* Brazilian Atlantic forest: how much is left and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation* 142, 1141-1153 (2009).
- 15 Banks-Leite, C. *et al.* 2014. Using ecological thresholds to evaluate the costs and benefits of set-asides in a biodiversity hotspot. *Science* 345, 1041-1045 (2014).
- 16 Fahrig, L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 34, 487-515 (2003).
- 17 Rockström, J. *et al.* A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472-475 (2009).
- 18 U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2017.
- 19 Fowler, D. *et al.* The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 368, 20130164 (2013).
- 20 Smith, V. H. & Schindler, D. W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology and Evolution* 24, 201-207 (2009).
- 21 Galloway, J. N. *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science* 320, 889-892 (2008).
- 22 Stevens, C. J. *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science* 303, 1876-1879 (2004).
- 23 Battarbee, R. W. Diatoms, lake acidification and the Surface Water Acidification Programme (SWAP): a review. *Hydrobiologia* 274, 1-7 (1994).
- 24 Simberloff, D. *et al.* Impacts of biological invasions: what's what and the way forward. *Trends in Ecology and Evolution* 28, 58-66 (2013).
- 25 Clavero, M. & García-Berthou E. Invasive species are a leading cause of animal extinctions. *Trends in Ecology and Evolution* 20, 110 (2005).
- 26 Sax, D. F. & Gaines, S. D. Species invasions and extinction: the future of native biodiversity on islands. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105: 11490-11497 (2008).
- 27 Holmgren, M. Exotic herbivores as drivers of plant invasion and switch to ecosystem alternative states. *Biological Invasions* 4, 25-33 (2002).
- 28 Camilo-Alves, C. S. P., da Clara, M. I. E. & Ribeiro, N. A. Decline of Mediterranean oak trees and its association with *Phytophthora cinnamomi*: a review. *European Journal of Forest Research* 132, 411-432 (2013).
- 29 Anderson, C. B. *et al.* The effects of invasive North American beavers on riparian plant communities in Cape Horn, Chile. Do exotic beavers engineer differently in sub-Antarctic ecosystems? *Biological Conservation* 128, 467-474 (2006).
- 30 Pauly, D., Watson, R. & Alder, J. Global trends in world fisheries: impacts on marine ecosystems and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 360, 5-12 (2005).

- 31 Morato, T., Watson, R., Pitcher, T.J. & Pauly, D. Fishing down the deep. *Fish and Fisheries* 7, 24-34 (2006).
- 32 Coleman, F. C. & Williams, S. L. Over exploiting marine ecosystem engineers: potencial consequences for biodiversity. *Trends in Ecology and Evolution* 17, 40-44 (2002).
- 33 Costello, C. *et al.* Status and solutions for the world's unassessed fisheries. *Science* 338, 517-520 (2012).
- 34 Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The State of World Fisheries and Aquaculture* (2014).
- 35 Pauly, D. & Zeller, D. Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. *Nature Communications* 7, 10244 (2016).
- 36 Secretariat of the Convention on Biological Diversity. *Global Biodiversity Outlook 3*. Montréal, 94 pages (2010).
- 37 Hooper, D. U. *et al.* A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature* 486, 105-108 (2012).
- 38 Subsecretaría de Pesca y Acuicultura. Departamento de Pesquerías. *Estado de Situación de las Principales Pesquerías Chilenas, Año 2015* (2016).
- 39 Duffy, J. E. *et al.* Biodiversity enhances reef fish biomass and resistance to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 6230-6235 (2016).
- 40 Serviço Florestal Brasileiro. *Sistema Nacional de Informações Florestais. Estoque das Florestas* (2016). <http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/estoque-das-florestas>
- 41 Baraloto, C. *et al.* Trade-offs among forest value components in community forests of southwestern Amazonia. *Ecology and Society* 19, 56 (2014).
- 42 Cragg, G. M. & Newman, D. J. Natural products: a continuing source of novel drug leads. *Biochimica et Biophysica Acta* 1830, 3670-3695 (2013).
- 43 Kull, C. A., de Sartre, X. A. & Castro-Larrañaga, M. The political ecology of ecosystem services. *Geoforum* 61, 122-134 (2015).
- 44 Latawiec, A. E. *et al.* Creating space for large scale restoration in tropical agricultural landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13, 211-218 (2015).

REFERENCIAS COMENTADAS

IUCN 2017. *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2017-1.*

Esta es la principal referencia mundial sobre el estado de conservación de las especies en el planeta. Según el propio sitio, la "Lista Roja de Especies Amenazadas de la IUCN™ es ampliamente reconocida como la más completa y objetiva herramienta global de evaluación del estado de conservación de las especies de plantas y animales."

Parmesan, C. *Ecological and evolutionary responses to recent climate change. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 37, 637-669 (2006).

Esta revisión, de Camille Parmesan, es uno de los trabajos más citados en Ecología de este siglo. En un texto muy amplio y detallado, la autora muestra las principales consecuencias de los cambios climáticos globales sobre la fenología, fisiología, distribución, evolución e interacciones entre las especies, basándose en trabajos de campo, modelos de distribución y experimentos de laboratorio y de campo. Concluye que las alteraciones en

la fenología, fisiología y distribución de las especies están correlacionadas con los cambios en el clima observados en el último siglo y que las especies más afectadas (y algunas ya hasta extintas) son aquellas que habitan las áreas más cercanas a los polos y en las cimas de las montañas. Los corales y los anfibios están entre las especies predominantemente tropicales más afectadas. Se han observado algunas adaptaciones evolutivas en función del aumento de la temperatura pero, hasta el momento, hay poca evidencia que los efectos negativos sobre las especies puedan ser mitigados.

Fahrig, L. *Effects of habitat fragmentation on biodiversity. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 34, 487-515 (2003).

Este estudio clásico discute cómo el uso de diferentes conceptos y medidas de fragmentación de hábitat pueden llevar a diferentes conclusiones en cuanto a la magnitud y dirección de su efecto sobre la biodiversidad. La autora resalta la importancia de estudiar la fragmentación a escala espacial del paisaje, separando los efectos de "pérdida de hábitat" de los efectos de la "fragmentación de hábitat" propiamente dicha, entendida como el desmembramiento del hábitat en manchas. Se presentan las principales medidas de fragmentación, demostrando cómo "pérdida" y "fragmentación" pueden producir efectos similares sobre la configuración del paisaje. El estudio concluye que hay más evidencia empírica del efecto negativo de la pérdida de hábitat sobre la biodiversidad, que del efecto de la fragmentación propiamente dicha.

Rockström, J. *et al.* *A safe operating space for humanity. Nature* 461, 472-475 (2009).

Este es un trabajo científico centrado en las ciencias ambientales y esta entre los más citados y comentados del siglo XXI. Rockström y un gran número de colaboradores presentaron la propuesta de un espacio seguro de operación para la humanidad. Este espacio se caracteriza por fronteras químicas, físicas y biológicas de cambios planetarios causados (o no) por el hombre que no deben ser superados con el desarrollo de la humanidad de lo contrario existe la posibilidad de una crisis ambiental seria para la biósfera y la humanidad. Los autores identifican nueve fronteras planetarias relacionadas, por ejemplo, con la pérdida de biodiversidad, cambios climáticos y cambios en los ciclos biogeoquímicos. Según ellos, al menos tres fronteras ya han sido superadas (pérdida de diversidad biológica, cambios en el ciclo del nitrógeno y cambios climáticos). Por tanto, según su argumentación, la humanidad ya estaría actuando sobre un sistema a punto de colapso donde se esperan cambios bruscos y de grandes proporciones.

Smith, V. H. & Schindler, D. W. *Eutrophication science: where do we go from here? Trends in Ecology and Evolution* 24, 201-207 (2009).

El fenómeno de la eutrofización artificial (ver detalles en el Glosario del Capítulo 6) ya era muy bien conocido en la literatura científica cuando se publicó el artículo. Por lo tanto, este trabajo presenta una revisión detallada pero de fácil comprensión sobre el fenómeno, cómo y por qué ocurre y, principalmente, lo que aún no se conoce sobre él (y por lo tanto necesita todavía ser estudiado). Por ejemplo, los autores apuntan que se sabe aún poco sobre cómo el exceso de nutrientes en un ecosistema altera su estabilidad temporal, sobre cómo el nitrógeno y el fósforo, responsables de la eutrofización, interactúan con otros contaminantes, incluso patógenos, y cómo podemos desarrollar estrategias globales eficaces de manejo de la calidad del agua en regiones costeras y estuarinas, que son las más afectadas por la eutrofización.

Simberloff, D. et al. Impacts of biological invasions: what's what and the way forward. *Trends in Ecology and Evolution* 28, 58-66 (2013).

Este artículo se centra en progresos recientes y retos futuros en el entendimiento del impacto de las especies invasoras. Los autores destacan la necesidad de pasar de una evaluación de impactos centrada en la pérdida de especies carismáticas concretas a una evaluación que contemple cambios integrados a escala de comunidad y ecosistema. También se incide en la conveniencia de desarrollar mejores métricas para cuantificar y categorizar impactos, contribuyendo así a una mejora en el análisis de riesgos y la priorización de actividades de manejo. En conjunto el artículo contribuye a reflexionar sobre la complejidad de la evaluación y percepción de los impactos de las especies invasoras por científicos, economistas y la sociedad en general, invitando a un mayor diálogo entre todos los agentes implicados para una más eficiente prevención y mitigación de impactos.

Especies Exóticas y Especies Invasoras. El Convenio sobre la Diversidad Biológica define como Especie Exótica, toda especie que se encuentra fuera de su área de distribución natural, es decir, que no es originaria de un determinado lugar. Las especies invasoras son especies exóticas que proliferan sin control y pasan a representar una amenaza para las especies nativas y para la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas.

Ríos Voladores. Los ríos voladores son “cursos de agua atmosféricos” formados por masas de aire cargadas de vapor de agua, muchas veces acompañadas por nubes, y que son propulsados por los vientos. En Iberoamérica, por ejemplo, tales corrientes de aire invisibles transportan humedad de la Cuenca Amazónica hacia el Centro-Oeste, Sudeste y Sur de Brasil. Para más información sobre los ríos voladores, ver <http://riosvoadores.com.br>

GLOSARIO

Biomás. Son grandes regiones geográficas caracterizadas, principalmente, por clima, fauna y flora similares. Por lo tanto, según esta definición, las especies presentes en un determinado bioma no deben estar presentes en otros biomas. Importantes biomas terrestres son, por ejemplo, los bosques tropicales, las sabanas, las praderas y los grandes desiertos. Algunos importantes biomas en Iberoamérica son: los Bosques tropicales en gran parte de América del Sur y Central, las Pampas y Estepas en el sur de América del Sur, especialmente en Uruguay y Argentina, la gran sabana brasileña localmente llamada Cerrado, los desiertos de clima árido chilenos y el Bosque Mediterráneo en Portugal y España.

Poblaciones. Es un nivel de organización biológica caracterizado por todos los individuos de una misma especie, que ocupan una determinada área al mismo tiempo. Otro importante nivel de organización ecológica son las comunidades, que son todas las poblaciones de diversas especies que ocupan la misma área al mismo tiempo y que potencialmente interactúan entre sí.

Redes Tróficas. Están compuestas por los organismos de una comunidad biológica (ver arriba) y sus interacciones alimenticias. Los productores primarios (plantas), los consumidores primarios (herbívoros que consumen estas plantas) y los demás consumidores, llamados depredadores.

Fenología. Es la rama de la ecología que estudia los eventos periódicos de la vida de la especie (ej. floración, crecimiento) en función de su reacción a las condiciones climáticas del ambiente.

Plasticidad Fenotípica. Es la capacidad de un organismo para alterar algunas de sus características morfológicas o fisiológicas en función del ambiente en que vive. En general, estos cambios son irreversibles. La aclimatación es un tipo específico de plasticidad fenotípica que es reversible (ej. el número de células en nuestra sangre cambia de acuerdo con la altitud y tales cambios son reversibles).



Santinho, Florianópolis, Brasil. Foto Pablo A. Marquet





La agricultura, la minería o el desarrollo de sistemas de transporte dependientes de combustibles fósiles han alterado de manera global los ciclos biogeoquímicos del planeta como el ciclo del carbono, el del nitrógeno o el ciclo del fósforo. Los efectos de estas alteraciones se traducen en cambios en las propiedades físico-químicas y biológicas de los ecosistemas. Paisaje del sur de Chile transformado por actividades productivas de tipo forestal y agrícola. Foto Pablo A. Marquet

Ciclos biogeoquímicos y cambios globales

Alex Enrich-Prast, Aurora Gaxiola, Ana Lúcia Santoro, Jorge Durán, Alexandra Rodríguez y Humberto Marotta

RESUMEN

Los ciclos biogeoquímicos están estrechamente relacionados con los procesos geológicos, hidrológicos y biológicos que ocurren en los diferentes compartimentos de la corteza terrestre (atmósfera, hidrósfera, litósfera y la biósfera). Estos ciclos están mediados por organismos vivos los que contienen importantes cantidades de carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), sin los cuales no podrían vivir. El C, el N y el P están acoplados biológicamente a través de las reacciones bioquímicas que controlan la **producción primaria** y la **descomposición** de la materia orgánica. Desde la revolución industrial y debido al crecimiento exponencial del uso de los combustibles fósiles y fertilizantes asociados a la agricultura intensiva, se ha producido un desequilibrio en los ciclos biogeoquímicos de casi todos los elementos y en especial en el aumento en la concentración atmosférica de CO₂ (desde 285 ppm en 1850 a 400 ppm en 2017), con importantes consecuencias sobre el funcionamiento de los ecosistemas. En este capítulo resumimos el efecto de las actividades humanas en el balance general de los ciclos del C, N y P, y discutimos posibles alternativas para mitigar estas alteraciones desde una perspectiva global.

Existen alrededor de 40 elementos químicos esenciales para la vida en la Tierra. Las reacciones mediadas por seres vivos convierten estos elementos químicos en compuestos orgánicos (biomasa), los cuales participan en una serie de reacciones fundamentales para las actividades de los seres vivos (metabolismo). El conjunto de procesos de transformación de los elementos químicos, así como su transferencia entre los distintos compartimentos bióticos y abióticos del planeta es lo que se denomina “ciclos biogeoquímicos”. El término “ciclo” indica que estas transformaciones de elementos químicos inorgánicos procedentes de minerales de rocas, agua o gases en compuestos orgánicos como proteínas, grasas o azúcares primariamente producidos por seres vivos pueden transformarse, a su vez, en componentes inorgánicos susceptibles de ser incorporados nuevamente por la biota. Estos procesos cíclicos basados en la transformación de elementos inorgánicos a orgánicos, y viceversa, mediados por la actividad biológica de síntesis y degradación de la materia orgánica, son la base de los procesos biogeoquímicos y de la vida en el planeta.

Los ciclos biogeoquímicos están estrechamente relacionados con los procesos geológicos, hidrológicos y biológicos que ocurren en los diferentes compartimentos de la corteza terrestre. Dichos compartimentos son la atmósfera (compartimento gaseoso por encima de la litósfera e hidrósfera), la hidrósfera (aguas continentales y marinas), la litósfera (rocas y suelos) y la biósfera (seres vivos y sus relaciones). Excluyendo eventos azarosos como la caída de meteoritos, que puedan incorporar nuevos elementos,



Los ciclos biogeoquímicos se desarrollan de distinta manera en función de las condiciones climáticas en los distintos tipos de ecosistemas. Por ejemplo, las temperaturas cálidas favorecen la actividad de las comunidades bacterianas y por tanto los procesos de respiración (emisión de CO_2 a la atmósfera). Este hecho tiene efectos en la dinámica del ciclo de carbono. (Izquierda: Lago Antártica (Foto Humberto Marotta). Derecha: Lago Cabúnas, Brasil. Foto Rómulo Campos

nuestro planeta es un sistema químico prácticamente cerrado, en el que las reacciones que sustentan la biosfera son alimentadas por la energía solar y, en menor parte, por la energía de los procesos geológicos internos (vulcanismo, tectónica superficial y profunda, convección del manto, etc.). Nuestro planeta posee una amplia variedad de ecosistemas terrestres y acuáticos distribuidos desde las bajas latitudes cálidas hasta las altas latitudes frías, donde los procesos biogeoquímicos son muy diversos debido en parte a las características geológicas y biogeográficas de dichos ecosistemas.

De entre todos los elementos químicos, los más abundantes en los seres vivos son el carbono (C), el nitrógeno (N) y el fósforo (P). El C es un elemento integral de todos los componentes orgánicos, lo que hace que sea fundamental para todas las formas de vida conocidas. El N es componente clave de compuestos orgánicos estructurales, como las proteínas que componen la biomasa, o de moléculas que contienen la información genética (ácidos nucleicos). Por su parte, el P es indispensable para la actividad metabólica, como parte de las moléculas involucradas en el almacenamiento y transporte de energía en los organismos o de compuestos que posibilitan las

reacciones. Así, tanto el N como el P son considerados nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y los microorganismos, y su disponibilidad es uno de los principales reguladores del funcionamiento de los ecosistemas y del mantenimiento de la biodiversidad.

El C, el N y el P están acoplados biológicamente a través de las reacciones bioquímicas que controlan la **producción primaria** y la **descomposición** de la materia orgánica. Todos los organismos necesitan que estos elementos estén presentes en ciertas proporciones específicas para su correcto funcionamiento. Por lo tanto, desequilibrios en los ciclos del C, del N y del P provocados por eventos naturales catastróficos (impactos meteoríticos, vulcanismo) o por las actividades humanas podrían tener importantes consecuencias en las dinámicas y en el funcionamiento de los ecosistemas.

De hecho, el crecimiento exponencial del uso de los combustibles fósiles y la agricultura intensiva desde comienzos de la revolución industrial hasta hoy en día han producido un desequilibrio en casi todos los ciclos biogeoquímicos. El resultado de este desequilibrio se manifiesta a través de fenómenos como el aumento en la concentración atmosférica de CO_2 (desde 285 ppm en



Amanecer en el Lago Jurubatiba. Foto Humberto Marotta

1850 a 400 ppm en 2017), el principal responsable del efecto invernadero y del calentamiento global), o los incrementos en la **deposición de N** y en los aportes de P en varios ecosistemas del mundo, los cuales han afectado su productividad y biodiversidad. Todo esto ha hecho que los estudios sobre los efectos del cambio global en la biogeoquímica del planeta sean cruciales para cualquier planeamiento de uso de los recursos de los ecosistemas.

En este capítulo resumimos el efecto de las actividades humanas en el balance general de los ciclos del C, N y P, y discutimos posibles alternativas para mitigarlos desde una perspectiva global.

1. Ciclo del carbono (C)

En la biósfera, el C se encuentra formando parte de la materia tanto inorgánica, en forma de carbonatos y bicarbonatos, como orgánica dentro de los compuestos producidos por el metabolismo de los organismos. De hecho, el C es el constituyente esencial de la biomasa de todos los organismos vivos conocidos, ya sea en forma de

compuestos estructurales o de sustratos de almacenamiento de energía, de los organismos que obtienen su energía vital rompiendo los enlaces químicos de los compuestos orgánicos. La circulación de las diferentes formas de C entre los distintos compartimentos de la Tierra es lo que se conoce como Ciclo del Carbono.

Desde un punto de vista metabólico, hay dos tipos de organismos: los que producen su propia biomasa para formar su estructura corpórea y fabricar reservas energéticas (productores primarios u organismos autótrofos) y los que obtienen biomasa a partir de otros organismos (heterótrofos).

Las vías metabólicas más importantes del planeta son la producción y **descomposición** de la materia orgánica por la fotosíntesis y la respiración, respectivamente. La fotosíntesis es la vía que captura dióxido de carbono (CO_2) y libera oxígeno libre (O_2), produciendo la biomasa de los organismos verdes (los que presentan clorofila, como algas, musgos y plantas) a partir del consumo de energía solar. La respiración es, a su vez, la vía de degradación de la biomasa a partir del consumo de O_2 y que resulta en la liberación de CO_2 a la atmósfera.

Además de la fotosíntesis, sostenida gracias a la energía solar, existen otras vías de **producción primaria** más comunes en zonas sin luz (como el fondo de los océanos), denominadas vías de quimiosíntesis, realizadas por organismos que producen biomasa a partir de la energía proveniente de reacciones químicas y no de la radiación solar¹. Así mismo, también existen vías metabólicas de degradación orgánica que no necesitan de O_2 (anaeróbicas) y que pueden producir no solamente CO_2 sino también metano (CH_4). Estas vías adquieren gran relevancia en zonas sin O_2 , como en los fondos de los ecosistemas acuáticos (océanos y lagos)². En cualquier caso, la producción de CO_2 por la degradación orgánica puede ocurrir tanto por vías aeróbicas (más eficientes), en presencia de O_2 (respiración), como por vías anaeróbicas, que no necesitan de O_2 , mientras que la producción de CH_4 es estrictamente anaeróbica. Debido a su capacidad de absorber calor algunos gases de C presentes en la atmósfera, especialmente CO_2 y CH_4 , producidos en los ecosistemas terrestres y acuáticos a partir de diferentes vías metabólicas, contribuyen al efecto invernadero que es un proceso fundamental para mantener las temperaturas apropiadas para el desarrollo de la vida del planeta

Otra reserva importante de C de la biósfera no se encuentra en forma de biomasa, sino en compuestos carbonatados en las aguas alcalinas de los mares y océanos³. El CO_2 es una molécula altamente reactiva que tiende a reaccionar con el agua y producir ácido carbónico (H_2CO_3), que a su vez puede ser convertido físico-químicamente (sin mediación biológica) en bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}), formas que no volatilizan directamente en la interface aire-agua (más detalles en Capítulo 7). Estos compuestos de C inorgánico disueltos en las aguas pueden formar minerales carbonatados sin la mediación de la actividad biológica (e.g. precipitación de calcita y acumulación en el fondo marino o de los lagos), pero también formar grandes estructuras calcáreas como los arrecifes coralinos o pequeños componentes corporales carbonados formados por la actividad de diferentes macro y microorganismos. Cuanto más alcalina sea el agua, más reservas de C inorgánico en bases carbonatadas habrá en los océanos. El aporte de

ácidos orgánicos terrestres transportados por las aguas continentales (ej. capa freática o ríos) y el aumento en la atmósfera del CO_2 , el cual puede convertirse en ácido al reaccionar con el agua de la lluvia o del mar, contribuyen al proceso natural de acidificación de los océanos. Este proceso disminuye el pH e incrementa las concentraciones de H_2CO_3 (la forma ácida de C inorgánico) en el agua, que a su vez puede convertirse en CO_2 en la interfase agua-aire y alcanzar la atmósfera. Este proceso no ocurre con las reservas de C inorgánico en forma de bases disueltas en el medio acuático (HCO_3^- y CO_3^{2-}). Así, el CO_2 es la principal moneda de cambio de la biogeoquímica global del C, moviéndose entre su forma libre y aquellas que forman las reservas de C orgánico e inorgánico.

El C es un elemento químico clave para los organismos, no sólo por formar su estructura orgánica y sustentarlos energéticamente, sino también por regular condiciones climáticas esenciales para la vida

1.1 La antropización del ciclo del C: amplificación del cambio global

El desarrollo de la agricultura y la ganadería desde el Neolítico contribuyó al aumento de las emisiones de CO_2 y CH_4 a la atmósfera, pero desde la revolución industrial este flujo ha sido peligrosamente intensificado llegando a ser un factor determinante del cambio climático¹⁰. El uso de las reservas orgánicas de C por la combustión de C fósil (principalmente petróleo y sus derivados, carbón y gas natural) para la generación de energía es el factor de cambio global de mayor relevancia en el ciclo del C. Este tipo de combustión emite a la atmósfera enormes cantidades de C en forma de CO_2 , que puede ser posteriormente fijado en biomasa por la **producción primaria** de los ecosistemas. Además, la deforestación antrópica (por tala o quema) afecta directamente a las reservas globales de C y contribuye al cambio climático no solo a través de la liberación de gases de efecto invernadero y de aerosoles a la atmósfera, sino también

a través de la disminución de la disponibilidad de agua (humedad), lo que disminuye la productividad y, por tanto, la capacidad de los ecosistemas de fijar carbono⁴. La deforestación también reduce la protección de los suelos frente a la erosión, intensificando la cantidad de materia orgánica que puede ser degradada, alcanzando ríos y océanos. Por ejemplo, el aporte de C a las aguas continentales ha aumentado desde la era preindustrial debido al incremento de la erosión del suelo⁵.

Otro proceso antropogénico de gran relevancia es la adición de nutrientes a los ecosistemas (**eutrofización**) debida a la intensificación de los efluentes procedentes de la agricultura (fertilizantes orgánicos o desechos agrícolas) o de los residuos urbanos (aguas residuales domésticas o industriales sin tratamiento). La **eutrofización** constituye un importante motor de cambio con una gran capacidad de influencia en el equilibrio del ciclo del C. A baja intensidad, la **eutrofización** de los ecosistemas acuáticos puede incluso aumentar la incorporación neta de C allí donde hay suficiente radiación solar para los productores primarios. Sin embargo, a altos niveles de **eutrofización** o en zonas más profundas y oscuras (e.g. fondos de lagos y océanos), lo más frecuente es la estimulación de la **descomposición** neta, lo que disminuye no sólo la cantidad de biomasa acumulada sino también la biodiversidad⁶. De forma similar, en los ecosistemas terrestres, un enriquecimiento de nutrientes también puede estimular la **producción primaria** neta (PPN), pero a altos niveles conlleva una disminución de las reservas de materia orgánica viva (en la vegetación) y muerta (en los suelos⁷).

Por otro lado, otros factores de cambio global también pueden disminuir las reservas de C inorgánico a través de la estimulación de pérdidas en forma de CO₂. Por ejemplo, el propio CO₂ de origen antropogénico reacciona con el agua marina, causando su acidificación debido a la subsecuente formación del H₂CO₃, un ácido que puede convertirse en CO₂ en la interface agua-aire. Estudios recientes apuntan claramente a que la pérdida de reservas de C en forma de carbonatos debida a la acidificación está directamente relacionada con la reducción de la

biodiversidad, al perjudicar a ciertos organismos, como los corales, que son responsables de la formación de estructuras de carbonato que sirven de recurso o refugio a otras especies marinas⁸.

Las actividades humanas están aumentando las emisiones de gases de C a la atmósfera al consumir reservas fósiles y reducir las reservas orgánicas e inorgánicas de los ecosistemas

La aceleración de los efectos del cambio global en el ciclo del C se debe en gran medida a la intensa conexión entre los diferentes compartimentos de la corteza terrestre (biosfera, litosfera, hidrosfera y atmósfera), que ayuda a propagar sus consecuencias, pero también a la amplificación de sus efectos en sí mismos. Es decir, al hecho de que un determinado factor de cambio global maximice su propio efecto, fenómeno denominado retroalimentación positiva. Un ejemplo de retroalimentación positiva es el anteriormente explicado de la deforestación por quema, que causa una disminución de la humedad, lo que a su vez reduce la cobertura vegetal por el aumento de la sequía⁴. La acidificación de los océanos por las emisiones antropogénicas de gases de C es otro ejemplo de retroalimentación positiva, ya que la liberación de CO₂ desde las aguas oceánicas, debida al aumento de la formación de compuestos ácidos (H₂CO₃), es acentuada todavía más por la propia bajada de pH⁸. Asimismo, cuando la presencia de varios factores juntos provoca mayores efectos que la simple suma del efecto de cada factor aislado estamos hablando de efectos sinérgicos. Un caso paradigmático de sinergia por cambio global es el que se produce entre el enriquecimiento de nutrientes en los mares costeros y el de CO₂ en la atmósfera, ya que evidencias experimentales indican que estos dos factores juntos pueden presentar mayores efectos sobre la productividad de algas que la simple suma de sus efectos aislados. Reacciones fisiológicas suelen estar detrás de estos efectos



Los incendios son una fuente de emisiones de carbono y nitrógeno en forma de gases a la atmósfera a consecuencia de la quema de la biomasa forestal. Foto de Humberto Marotta

sinérgicos, como en el caso del efecto de la bajada de O_2 (hipoxia) y del calentamiento global sobre la mortandad de organismos marinos, consecuencia de la intensificación de la actividad metabólica que incrementa la demanda de O_2 y, por tanto, su escasez, más de lo que se esperaría por el aumento aislado de la temperatura. En el Capítulo 8 se detallan más estudios de casos de retroalimentación positiva y sinergismo en los procesos biogeoquímicos.

1.2 ¿Qué hacer?

Las evidencias científicas indican que para reducir significativamente las emisiones de C a la atmósfera es imprescindible sustituir el uso de combustibles fósiles por fuentes de energía alternativas (e.g. solar, eólica, biogas o hidrógeno). La pérdida de cobertura vegetal, incluso si está motivada por la generación de energía hidroeléctrica o por la creación de plantaciones para biocombustibles, debe ser analizada con mucha atención debido a las consecuencias potencialmente negativas de los procesos de deforestación. Además de todos los valores materiales e inmateriales de la biodiversidad, las tasas de **producción primaria** de la vegetación son fundamentales para regular el ciclo del C y el

clima de nuestro planeta. Por tanto, la regulación climática mediada por el ciclo del C está directamente conectada con el mantenimiento de la biodiversidad, un tema que debe estar presente en cualquier planeamiento sobre el uso de los recursos naturales a medio y largo plazo.

2. Ciclo del nitrógeno (N)

El N es un elemento imprescindible para la vida en nuestro planeta, ya que forma parte de las moléculas que constituyen las proteínas (los aminoácidos) y el código genético (los ácidos nucleicos), y es un componente esencial de las enzimas, proteínas que posibilitan la mayoría de las reacciones metabólicas de síntesis y degradación de la materia orgánica. La forma molecular del N (N_2) constituye el 78.1% de la atmósfera terrestre y es la forma de N más abundante de la Tierra. Sin embargo, se trata de una molécula prácticamente inerte y no disponible para la mayoría de los organismos vivos. Estas características hacen que el N sea uno de los nutrientes más limitantes para la PPN en los ecosistemas terrestres. Tal es así que su disponibilidad probablemente haya controlado el tamaño y la actividad de la biosfera desde la aparición de los primeros organismos en el planeta⁷.

Debido a que el N está ausente en la mayoría de los sustratos primarios (rocas de la corteza terrestre), inicialmente todo el N disponible para la **biota** deriva del proceso conocido como **fijación del N**, que transforma el N_2 atmosférico en **N reactivo (Nr)**, utilizable por los seres vivos. Este proceso es llevado a cabo de forma natural principalmente por unas pocas especies de microorganismos, tanto de vida libre (en lagos, suelos y sedimentos) como asociadas simbióticamente a las raíces de las plantas, y en menor medida por relámpagos. De acabar aquí las rutas biogeoquímicas del N, el N_2 de la atmósfera se iría agotando paulatinamente, pero algunos microorganismos son capaces de realizar el proceso denominado desnitrificación. En este proceso se utilizan formas reactivas de N en rutas metabólicas que, en última instancia, producen como subproducto N_2 que vuelve a la atmósfera, cerrando así el ciclo biogeoquímico global del nitrógeno. Además, los incendios forestales también pueden producir una importante salida de N a la atmósfera, ya que alrededor del 30% del todo el N contenido en la biomasa afectada se volatiliza en forma de N_2 a través de un proceso denominado piro desnitrificación. En cualquier caso, la **fijación natural del N_2 atmosférico** sólo pone a disposición de los organismos una pequeña cantidad de todo el N involucrado en la PPN del planeta, por lo que satisfacer los requerimientos de N de todos los productores primarios precisa de un eficiente reciclado interno a través de procesos como la **descomposición** de la materia orgánica y la **mineralización del nitrógeno**⁷.

2.1 La antropización del ciclo del N: superando los límites planetarios

Los seres humanos han aumentado radicalmente la tasa natural de **fijación del N_2** y las entradas de **Nr** a los ecosistemas debido al cultivo extensivo de plantas fijadoras de N (e. g. soja, garbanzo, maní) y a la producción industrial de fertilizantes nitrogenados (proceso de Haber-Bosch). Más de cien mil toneladas de N son añadidas al suelo anualmente en forma de fertilizantes para mejorar la producción agrícola⁹, pero tan solo un 20 o 30% del N total contenido en estos fertilizantes es finalmente consumido por los humanos en forma de alimento. Del resto del N contenido en los fertilizantes, una parte se pierde por **escorrentía** y/o **lixiviación**, causando muchas veces la

eutrofización de acuíferos y ecosistemas acuáticos. El exceso de **Nr** en acuíferos supone una pérdida de calidad del agua y un problema de salud pública, mientras que en los ecosistemas acuáticos (ríos, lagos, océanos) puede conllevar pérdidas de biodiversidad por acidificación y/o **eutrofización** (ver apartado sobre el ciclo del fósforo para más información). Otra parte del N contenido en los fertilizantes es devuelta a la atmósfera en forma de amoníaco (NH_3) o de alguno de los productos de la desnitrificación, como el óxido nitroso (N_2O) o el N_2 . La quema de combustibles fósiles ha aumentado también la emisión de grandes cantidades de **Nr** a la atmósfera, principalmente en forma de óxidos de N (NO_x , principales causantes de la lluvia ácida) y de NH_3 . La mayor parte de todo este **Nr** emitido a la atmósfera acaba depositándose en la tierra por precipitación, donde entra de nuevo en el ciclo biogeoquímico global del nitrógeno.

De las más de cien mil toneladas de N añadidas al suelo anualmente en forma de fertilizantes, tan solo el 20-30% son finalmente consumidas por los humanos en forma de alimentos

Por otro lado, el aumento de la disponibilidad de N en los ecosistemas terrestres debido a todas estas actividades antropogénicas aumenta las tasas de **nitrificación** y desnitrificación, lo que a su vez provoca un aumento de las emisiones de óxido nitroso (N_2O) a la atmósfera. El N_2O tiene un potencial de efecto invernadero unas 300 veces mayor que el del CO_2 y hoy en día es ya uno de los principales causantes del calentamiento global¹⁰. Además, las emisiones de este gas son la mayor amenaza para la capa de ozono del siglo XXI, pese a lo cual todavía no existe una regulación internacional para reducir el efecto nocivo del N_2O en la capa de ozono¹¹.

Es cierto que el desequilibrio del ciclo del N por efecto de las actividades humanas ha permitido la obtención de alimento para una creciente población y ha estimulado el secuestro global de CO_2 atmosférico tanto en ecosistemas marinos como terrestres. Sin embargo, este

hecho se ha alcanzado a costa de cambios en el ciclo del N que han superado en mucho un límite planetario aceptable, empujando el sistema de la Tierra fuera del estado medioambiental del Holoceno, con consecuencias perjudiciales o incluso catastróficas para numerosas zonas del planeta¹². Los impactos ambientales de este desequilibrio no tienen sólo consecuencias ecológicas negativas, como las descritas en los párrafos anteriores (e. g. **eutrofización**, aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, etc.), sino también económicas. En este sentido, estudios recientes han cuantificado los efectos negativos de la **fijación antropogénica de N** para Europa en 70–320 mil millones anuales, y es probable que los costes globales sean de un orden de magnitud mayor¹³.

La alteración del ciclo del N en este siglo va a depender fundamentalmente de las demandas de alimento y de la actividad y técnicas industriales de una población humana en aumento y cada vez más consumista, pero también de los cambios esperados en el clima del planeta. Un estudio publicado recientemente predice que los cambios en el clima y en el uso del suelo durante el siglo XXI aumentarán tanto la **fijación biológica de N** (de 120 a 166 Tg N año⁻¹ en los océanos y de 128 a 170 Tg N año⁻¹ en los ecosistemas terrestres) como antropogénica, hasta un total de 600 Tg N año⁻¹ en el 2100¹⁴. Las emisiones terrestres de NH₃ antropogénico aumentarán debido a una subida en la temperatura global del planeta y al efecto del incremento en Nr fijado antropogénicamente (motivado por la creciente demanda de alimentos y por cambios en la dieta). Las emisiones de NO_x y N₂O a partir de ecosistemas terrestres aumentarán hasta en un orden de magnitud en el caso del N₂O debido a la estimulación de las tasas de **nitrificación** y desnitrificación por efecto del cambio climático. Además, una mayor entrada de Nr al mar por **deposición atmosférica** y procedente de los ríos también provocará un aumento de las emisiones de N₂O desde los ecosistemas marinos. Debido al potente efecto invernadero del N₂O, el aumento en las emisiones de este gas tendrá a su vez un impacto significativo sobre la temperatura del planeta. Este último efecto lleva a un caso paradigmático de retroalimentación positiva entre diferentes factores de cambio global¹⁴, en el que cambios antropogénicos en el clima provocarán cambios en el ciclo del N, lo que a su vez afectará de nuevo al clima del planeta.

Por otro lado, algunos flujos de N podrían reducirse en las próximas décadas. Por ejemplo, se espera una reducción en las emisiones de NO_x, producto de la combustión de combustibles fósiles debido al uso extendido de tecnologías de control, tanto en vehículos como en plantas industriales. Además, las emisiones de NH₃ desde los océanos también podrían disminuir debido a que la acidificación de los océanos, causada por el aumento de CO₂ atmosférico, compensaría el efecto que podrían tener en las emisiones de NH₃ el aumento de la temperatura del agua. No obstante, se estima que los dos grandes flujos de Nr, el terrestre y el oceánico, aumenten sustancialmente durante el siglo XXI, con un incremento global de las emisiones de las diferentes formas de Nr y su posterior **deposición** en los ecosistemas. Además, se espera que esta **deposición de N** sea muy variable espacialmente, con incrementos particularmente grandes en países en vías de desarrollo de Latinoamérica, África y Asia.

Los cambios en el ciclo del N han superado en mucho un límite planetario aceptable, con consecuencias perjudiciales o incluso catastróficas en muchas zonas del planeta

2.2 ¿Qué hacer?

En las últimas décadas ha habido iniciativas políticas que han conseguido reducir las entradas de Nr a los ecosistemas. Estos intentos se han llevado a cabo gran parte de las veces a nivel regional o nacional, y siempre en países desarrollados, hasta hoy principales emisores de N a la atmósfera y productores de fertilizantes nitrogenados. Sin embargo, a tenor de las potenciales consecuencias de las alteraciones del ciclo del N sobre el funcionamiento de los ecosistemas, es crucial la aplicación de medidas efectivas de carácter internacional para limitar la producción y las emisiones de Nr¹⁴. La sustitución de combustibles fósiles por fuentes alternativas de energía, las mejoras en la eficiencia del uso del N en los sistemas agrícolas, una distribución más equitativa de la producción mundial de Nr, así como la optimización del transporte y cambios en los patrones de consumo de alimentos serían algunas de



Los cambios en el uso del suelo generados por la expansión de la agricultura intensiva es uno de los motores de desequilibrio del ciclo biogeoquímico del nitrógeno. Plantación de soja en Rio Grande do Sul en Brasil. Foto Tiago Fioreze

las medidas que podrían reducir la producción y uso de N reactivo. Estas medidas también ayudarían a reducir las entradas de N_r a la atmósfera y su posterior **deposición**. Si se consideran las implicaciones económicas de la **deposición de N** antes mencionadas, parece claro que estos cambios ofrecerían beneficios no sólo medioambientales sino también económicos.

3. Ciclo del fósforo (P)

El fósforo (P) es uno de los elementos más comunes de la Tierra y es esencial para todos los seres vivos ya que forma parte de estructuras químicas indispensables para la vida, como las involucradas en la obtención de energía celular (**Adenosin trifosfato; ATP**), en la genética (ácidos nucleicos; ADN), o en la estructura

de membranas celulares, huesos y dientes, siendo imprescindible para muchos procesos de la vida (e.g. crecimiento, reproducción). El P no tiene una molécula gaseosa y no está presente en la atmósfera como el N y el carbono. Por el contrario, este elemento lo encontramos en moléculas de fosfato formando parte de minerales de la corteza terrestre como la apatita o la fosforita, los cuales se han formado durante millones de años. De este modo, el ciclo biogeoquímico del P cuenta con procesos que ocurren a escala geológica, como la formación del mineral apatit y el afloramiento de rocas por procesos de tectónica de placas⁷, que hacen que el P no sea renovable y su disponibilidad en la tierra sea finita, al menos en tiempos de escala humana.

Esta cualidad del P hace que el reciclaje de su contenido en la materia orgánica sea indispensable para el

mantenimiento de la diversidad y, por lo tanto, de las funciones ecosistémicas. En los sistemas naturales existe un alto reciclaje interno de fósforo. Casi todo el P que es absorbido por las plantas e incorporado en tejidos vegetales y animales regresa a los ecosistemas a través de las transformaciones químicas que ocurren durante la **descomposición**. Es decir, las plantas absorben P del suelo -principalmente en forma de fosfatos- y los animales lo obtienen de las plantas u otros animales. Cuando estos organismos mueren, el P se recicla durante la **descomposición** de los residuos orgánicos y se reincorpora al ecosistema. Por lo tanto, los residuos orgánicos son un aporte fundamental que, a través de la **descomposición**, mantiene el P disponible para los organismos vivos por cientos y miles de años en los ecosistemas¹⁵. Por el contrario, la disminución de la disponibilidad de P y de las tasas de reciclaje de la materia orgánica reducen drásticamente la productividad primaria de los ecosistemas y los pueden llevar a estados de **retrogresión**. En los estados de **retrogresión**, tanto la biodiversidad como las funciones ecosistémicas disminuyen, y se requieren perturbaciones catastróficas (e. g. terremotos, vulcanismo) para reactivar a los ecosistemas. Sin embargo, existen ecosistemas con alta diversidad biológica que se han desarrollado en suelos muy viejos, suelos que con el tiempo han perdido casi todos los minerales de P que tenían originalmente. Por ejemplo, los ecosistemas mediterráneos de Australia y Sudáfrica, en donde coexisten especies con alta capacidad para usar eficientemente el fósforo.

3.1 La antropización del ciclo del P: Del mineral, el tenedor, y el ciclo roto del fósforo

El ciclo biogeoquímico del P ha sido transformado principalmente por la extracción industrializada de minerales de P, el uso masivo de fertilizantes en la agricultura intensiva y la falta de reciclaje de residuos orgánicos (ver Capítulo 3). Al año se extraen aproximadamente 14 megatoneladas de P mineral, que se aplican en forma de fertilizantes y de las cuáles el 75% se almacena en los suelos agrícolas o se pierde, ya sea por

lixiviación o **escorrentía**. Los animales excretamos gran parte del P que consumimos ya que, en promedio, un humano requiere entre 0,6 y 0,7 gramos de P al día para mantener sus funciones vitales, pero ingiere alrededor de tres gramos en los alimentos que consume, es decir, mucha más cantidad de P de la que puede asimilar. Si relacionamos nuestra ingesta de P con lo que se requiere para producir nuestros alimentos, tenemos que anualmente en nuestros alimentos consumimos únicamente tres de las 14 megatoneladas de P que se extraen de los reservorios minerales del mundo^{16,17}, de las cuáles, además, únicamente asimilamos una pequeña parte.

Las pérdidas de P de los sistemas agrícolas se deben fundamentalmente a la alta reactividad de este elemento y su facilidad para ser transportado a través de procesos de **lixiviación** y/o **escorrentía** a las aguas subterráneas y ecosistemas dulceacuícolas. Las pérdidas en forma de fosfato a través de ríos o sistemas acuáticos, tienen importantes consecuencias ecológicas negativas en ecosistemas en donde el P se encuentra de manera natural en niveles muy bajos (e.g. ecosistemas dulceacuícolas, lagos). En estos sistemas, el incremento en la disponibilidad de P, tal y como también ocurre con el N (ver sección anterior), favorece la proliferación acelerada de algas que consumen el oxígeno del sistema dando lugar a procesos de **eutrofización**. Estas algas al morir generan un gran aporte de detritos a los ecosistemas y aceleran los procesos de **descomposición** microbiana que agotan el oxígeno disuelto, resultando en condiciones de anoxia. A consecuencia de estos eventos de anoxia se produce la muerte por asfixia de poblaciones enteras de peces, así como el desequilibrio químico de lagos y ríos. La combinación de procesos de **eutrofización** y anoxia da lugar a lo que se conoce como zonas muertas (i.e. *dead zones* en inglés). Actualmente existen más de 400 zonas muertas costeras en las desembocaduras de los ríos y se calcula que estas se están expandiendo a una tasa de 1% por año¹⁸. El incremento de P en suelos de diversas partes del mundo por el uso de fertilizantes en la agricultura intensiva ha alterado también la dinámica de ecosistemas naturales al afectar al crecimiento de especies vegetales y a la actividad microbiana¹⁵. Por lo que el uso de grandes

cantidades de fertilizantes representa una amenaza para la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres y dulceacuícolas, ya que la **eutrofización** y contaminación de aguas subterráneas conlleva la pérdida de hábitat, un aumento en la frecuencia y severidad de los afloramientos de algas nocivas, la hipoxia, la pérdida de agua potable y potencialmente la pérdida de biodiversidad.

Como hemos mencionado, la industria agrícola moderna, que es el mayor usuario de P, utiliza al año entre 14 y 15 megatoneladas de P mineral que se formó hace más de 10 o 15 millones de años¹⁷, y la gran mayoría de este P no es reciclado in situ. Esto ha “roto” el ciclo biogeoquímico natural del P, no solamente porque hemos incrementado exponencialmente los flujos de salida (i.e. extracción mineral industrializada) y eliminado los flujos de entrada (e. g. los desechos orgánicos van a rellenos sanitarios o se pierden en los sistemas de drenaje), sino también porque ahora movemos el P a grandes distancias. Por ejemplo, India, el principal importador de fertilizantes de P del mundo, le compra fertilizantes a China, y ese P viaja -ya sea por barco o por avión- al menos 2.500 kilómetros. Asimismo, alrededor del 60% del P que se utiliza en los fertilizantes se pierde a través de ríos y sistemas fluviales. De lo anterior podemos deducir que una gran parte del P que proviene de yacimientos minerales que se formaron en China hace millones de años termina, en periodo de meses, en los ríos y sistemas acuáticos de la India y océanos circundantes. Por otro lado, hoy en día más de la mitad de la población humana vive en centros urbanos, lo que está transformando a las ciudades en “puntos calientes” de P, es decir, sitios con altas concentraciones de P que no es utilizado por plantas u otros organismos. Según cálculos recientes, los humanos excretamos alrededor de tres megatoneladas de P al año¹⁶, es decir, medio kilogramo por persona y año, por lo que en las ciudades se vierten anualmente miles de toneladas de P en la orina y otros desechos humanos que, al no reciclarse, contaminan los ecosistemas acuáticos (**eutrofización**). De este modo, el uso elevado de P mineral (e.g. fosfatos) en la agricultura intensiva y la instalación de sistemas de drenaje para eliminar desechos humanos en las ciudades ha roto el ciclo del P.

3.2 ¿Qué hacer?

Es indispensable que se adopten mejores métodos de uso y aplicación de fertilizantes (se pierden ocho megatoneladas de fertilizantes al año¹⁷), así como de reciclaje de residuos orgánicos (se pueden recuperar tres megatoneladas que se pierden en los desagües y 1,2 megatoneladas en campos agrícolas¹⁶). Esto promovería la conservación de formas minerales de P en los agrosistemas, y reduciría la contaminación de las cuencas y ecosistemas dulceacuícolas. Asimismo, es importante recordar que el P es altamente reciclable, por lo que se podría extraer y re-utilizar a partir de desechos agrícolas, humanos y animales.

4. Consideraciones finales

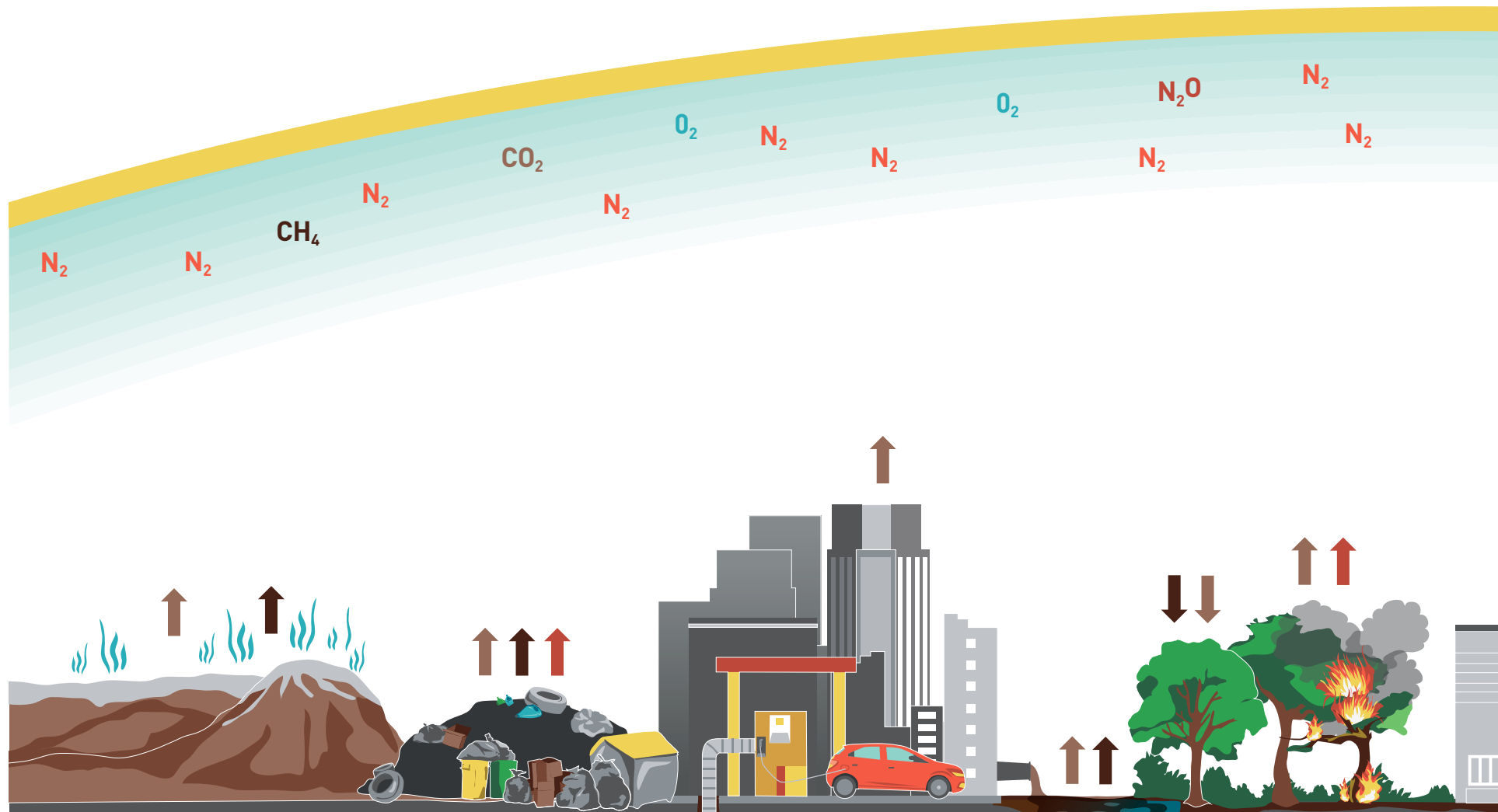
La relevancia de los ciclos de nutrientes está en el gran volumen de materia y energía implicada en sus procesos de ciclado y el papel clave de estos elementos en la formación y mantenimiento de la biosfera. Las actividades humanas y el cambio global han modificado los ciclos biogeoquímicos del C, N y P, por tanto, el funcionamiento general de los ecosistemas.

La movilización de C y N desde la corteza terrestre a la atmósfera actualmente ha aumentado entre 13 y 37 veces si se compara con las fuentes naturales geológicas en el período pre-industrial⁷. En este escenario, Rockstrom y colaboradores¹² identificaron umbrales críticos para procesos clave del cambio global del sistema Tierra que, de ser superados, darían lugar a cambios ambientales insostenibles. Las estimaciones de los autores muestran que estamos cerca del umbral crítico para la interferencia humana en el ciclo global del P y más allá de los límites de seguridad para la interferencia en el ciclo del N.

Asimismo, las consecuencias de la inestabilidad de los ciclos afectan a su vez a las causas y se generan procesos de retroalimentación positiva. Por ejemplo, las emisiones de CO₂ que desequilibran el ciclo de C, causan el cambio climático, y este afecta a su vez a los reservorios de C del planeta. Ejemplos similares se encuentran también para los ciclos de

EL SER HUMANO Y LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Los gases dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) han contribuido a la retención de calor en nuestra atmósfera desde hace millones de años. Desde la revolución industrial, ciertas actividades humanas han alterado el balance de nutrientes en los ecosistemas naturales, estimulando la producción y la emisión de estos tres gases, aumentando así la retención de calor en la atmósfera y dando lugar al conocido "efecto invernadero".



Deshielo
El aumento de la temperatura del planeta debido al efecto invernadero derrite las capas de hielo causando la emisión de grandes cantidades de CO_2 y CH_4 almacenado y estimulando aún más el efecto invernadero.

Descomposición
La basura producida en las ciudades se almacena en vertederos, lo que favorece la producción de CO_2 , CH_4 y N_2O y la emisión de estos gases a la atmósfera.

Combustible fósil
La materia orgánica ha estado almacenada desde hace millones de años en forma de reservas de petróleo. La extracción y la quema de estas reservas supone la emisión de grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera.

Agua residual
Las aguas residuales contienen grandes cantidades de materia orgánica y de nutrientes. Los vertidos de estas aguas en ambientes naturales potencian la producción y la emisión de gases de efecto invernadero.

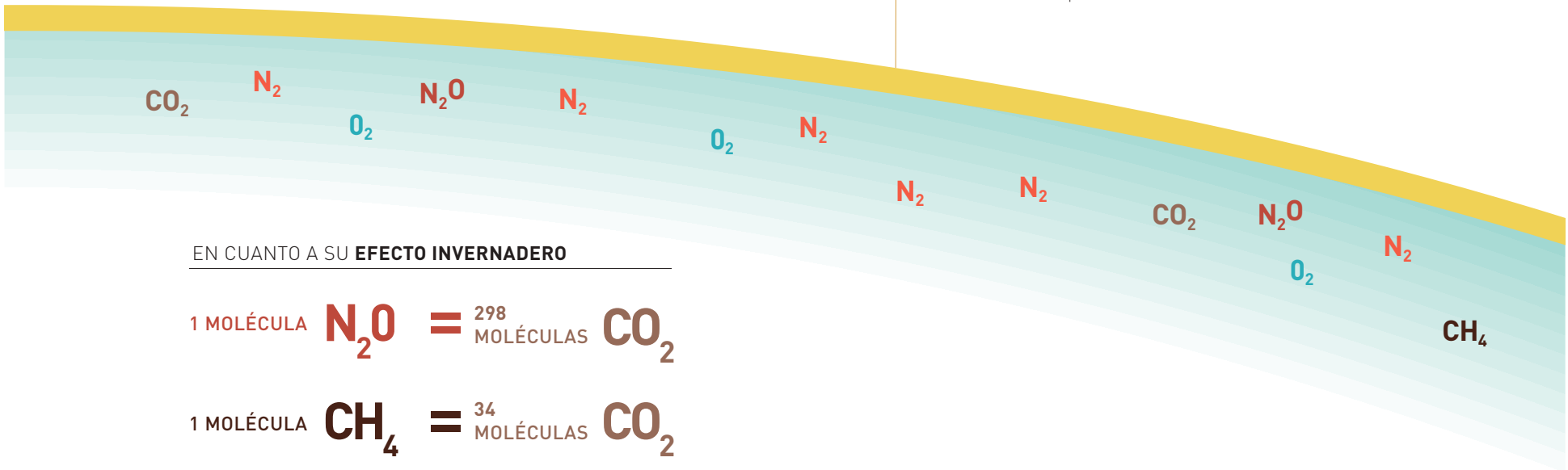
Bosques
Los bosques son responsables del secuestro de enormes cantidades de CO_2 y CH_4 de la atmósfera.

Incendios forestales
Los incendios forestales causan la liberación de millones de toneladas de CO_2 y de N_2O a la atmósfera.

- ➔ CO_2 Dióxido de carbono
- ➔ CH_4 Metano
- ➔ N_2O Óxido nitroso
- ➔ P Fósforo

EFECTO INVERNADERO

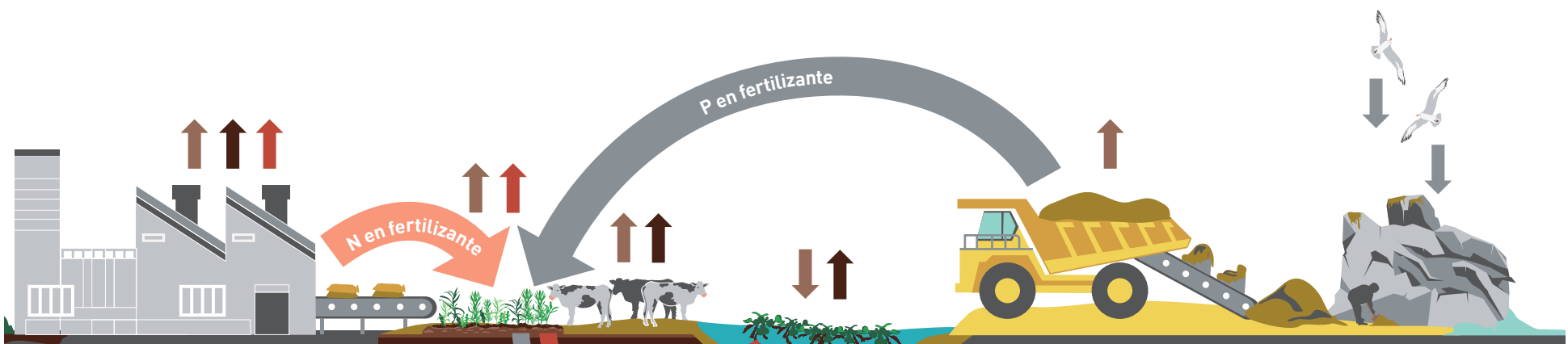
Diversas moléculas y partículas retienen radiación térmica, regulando la temperatura de la atmósfera. Sin este proceso, la temperatura en la superficie del planeta sería mucho menor de lo que es hoy en día, afectando directamente a las formas de vida del planeta.



EN CUANTO A SU EFECTO INVERNADERO

1 MOLÉCULA N_2O = 298 MOLÉCULAS CO_2

1 MOLÉCULA CH_4 = 34 MOLÉCULAS CO_2



Procesos industriales

Las actividades industriales consumen mucha energía y tienen como consecuencia la emisión directa o indirecta de grandes cantidades de CO_2 , CH_4 y N_2O . La actividad industrial está considerada una de las principales causas del cambio climático en nuestro planeta.

Producción de fertilizantes

La producción de fertilizantes es responsable del 1,2% de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero.

Fertilizantes

El aumento de la población lleva al incremento de la demanda de alimentos. Para atender esta demanda se usan grandes cantidades de fertilizantes para incrementar la producción agrícola. El uso de estos fertilizantes produce desequilibrios en ambientes naturales.

Ganadería

La ganadería extensiva está relacionada con grandes emisiones de CH_4 .

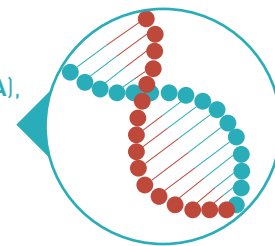
Fósforo

El fósforo (P) es un elemento imprescindible para la producción agrícola. El ser humano ha utilizado las reservas de P indiscriminadamente, y dichas reservas podrían agotarse en este siglo, lo que llevaría a la humanidad a una crisis alimentaria. Asimismo, la extracción de P incrementa la emisión de gases de efecto invernadero.

Guano

Los excrementos de los pájaros, ricos en fósforo, nitrógeno y potasio, pueden ser usados como fertilizantes.

YA SEAN PLANTAS O ANIMALES, EL ATP (FOSFATO DE ADENOSINA), CUYA COMPOSICIÓN SE BASA PRINCIPALMENTE EN EL FÓSFORO, ES LA FUENTE DE ENERGÍA CELULAR



N y P. Es llamativo, que la mayoría de los cambios globales afecten especialmente a los ciclos biogeoquímicos de los que más depende la especie humana, comprometiendo así su propia supervivencia.

El acuerdo de París, tratado que ha sido firmado por una gran mayoría de naciones del planeta en 2016, es un gran paso en la búsqueda de la reducción de las emisiones de gases de efecto **invernadero** y, su cumplimiento, ciertamente, traerá múltiples beneficios en lo que respecta al consumo de energía y disminución de la utilización de combustibles fósiles. Sin embargo, es imperativo que nuestra sociedad tome decisiones similares para establecer límites para el consumo de N y P y regular el aporte de estos nutrientes a los ecosistemas. De los diferentes sectores de la sociedad, dos de ellos, la agricultura y el tratamiento de residuos, llaman más la atención y demandan un esfuerzo extra para controlar los flujos y las pérdidas de N y P.

Los actuales 7.000 millones de seres humanos en nuestro planeta afectan, y continuarán afectando, a los ciclos de N y P. Sin embargo, los impactos sobre el planeta pueden ser ampliamente reducidos si los métodos de uso y aplicación de fertilizantes son mejorados, buscando una mayor eficiencia en su utilización. También se debe resaltar que un tratamiento eficaz de los residuos orgánicos producidos por la sociedad puede generar energía (por ejemplo, biogas) y biofertilizantes que, al ser utilizados en la agricultura, disminuyen la demanda de **fijación de N** atmosférico y minimizan el flujo global de P. En este capítulo se ha puesto de manifiesto el efecto evidente que las tecnologías para minimizar los impactos causados por el exceso de N y P ya existen. Lo que falta es la decisión política de nuestros gobernantes para ponerlas en práctica.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 Enrich-Prast, A. Bastviken, D., & Crill, P. Chemosynthesis. Pp. 211-225. En: Likens, G. E. (ed) Encyclopedia of inland waters. Elsevier, Oxford (2009).
- 2 Bastviken, D. Methane. Pp. 783-805. En: Likens, G. E. (ed) Encyclopedia of inland waters. Elsevier, Oxford (2009).

- 3 Hoegh-Guldberg, O., & Bruno, J. F. The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science*, 328, 1523-1528 (2010).
- 4 Bonan, G. B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320, 1444-1449 (2008).
- 5 Regnier, P., Friedlingstein, P., Ciais, et al. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience* 6, 597-607 (2013).
- 6 Diaz, R. J., & Rosenberg, R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321, 926-929 (2008).
- 7 Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change, 3rd Edition. Academic Press, 672 pp. (2013).
- 8 Hoegh-Guldberg, O. *et al.* Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318, 1737-1742 (2007).
- 9 FAO. Current world fertilizer trends and outlook to 2016. Rome. 43 pp. (2012).
- 10 Pachauri, R. *et al.* Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 151 pp. (2014).
- 11 Ravishankara, A. R., Daniel, J. S., & Portmann, R. W. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326, 123-125 (2009).
- 12 Rockström, J. *et al.* Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14, 2 (2009).
- 13 Sutton, M. *et al.* Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 114 pp. (2013).
- 14 Fowler D. *et al.* Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 13849-13893 (2015).
- 15 Vitousek, P. *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20, 5-15 (2010).
- 16 Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19, 292-305 (2009).
- 17 Smil, V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 53-88 (2000).
- 18 Rabalais, N. *et al.* Global change and eutrophication of coastal waters. *ICES Journal of Marine Science*, 66, 1528-1537 (2009).

REFERENCIAS COMENTADAS

Fowler, D. *et al.* Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 13849-13893 (2015).

En este artículo, Fowler *et al.* realizan un excelente trabajo de revisión de trabajos científicos publicados con información relevante acerca de los efectos del cambio global sobre el ciclo del nitrógeno (N). Este trabajo representa el mayor esfuerzo realizado hasta la fecha para estimar la magnitud de los cambios que las actividades antropogénicas han producido hasta la actualidad en flujos y procesos clave del ciclo global del N (e.g. fijación, deposición, transporte, emisiones, etc.). Además, presenta estimaciones sobre estos efectos

para lo que resta de siglo XXI. De especial relevancia es el análisis que los autores hacen de la efectividad de las medidas de control - generalmente de carácter regional - puestas en marcha hasta la fecha, así como la justificación de la necesidad de implementar una estrategia global para la regulación de los impactos de las actividades humanas sobre el ciclo del N.

Regnier, P. et al. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience*, 6, 597-607 (2013).

Este artículo de revisión revela la magnitud actual de los flujos de carbono laterales entre la tierra y el océano, así como el grado en el que las actividades humanas han alterado dichos flujos. Los autores sugieren que es necesario incluir los flujos de carbono a lo largo del continuo tierra-océano en las estimas globales de dióxido de carbono. Además, muestran que la perturbación antropogénica podría haber aumentado el flujo de carbono a aguas continentales hasta 1.0 Pg C año⁻¹ desde la época pre-industrial, principalmente debido a un aumento de la exportación de carbono del suelo.

Rockström, J. et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14, (2009).

Rockstrom et al. presentan un nuevo concepto, los límites planetarios, para estimar un espacio operativo seguro para la humanidad con respecto al funcionamiento de nuestro planeta, proponiendo un nuevo enfoque para la sostenibilidad global y cambiando el enfoque de gobierno y gestión. Además, los autores identificaron procesos clave del Sistema Tierra e intentan cuantificar para cada proceso el nivel límite que no debería sobrepasarse si queremos evitar un cambio ambiental global inaceptable. Entre estos procesos están la concentración de CO₂ en la atmósfera, la acidificación de los océanos y los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y el fósforo.

Schlesinger, W. H. & Bernhardt, E. S. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change, 3rd Edition. Academic Press 672 pp. (2013).

Este es un libro de texto sobre la química de la superficie de la Tierra. La vida en el planeta hoy en día se ve cada vez más afectado por las actividades humanas. El libro habla de cómo funciona la Tierra como un sistema químico de forma natural, de los eventos que han causado cambios en la química de la superficie de la Tierra en el pasado y de lo que está causando que nuestro planeta cambie rápidamente en la actualidad. El libro combina una amplia gama de disciplinas, desde la astrofísica hasta la biología molecular, así como de escalas temporales, desde el origen de la Tierra hasta las próximas décadas.

Sutton, M. A. et al. Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. NERC/Centre for Ecology & Hydrology 114 pp. (2013).

La Alianza Global para la Gestión de Nutrientes y la Iniciativa Internacional del Nitrógeno escribieron este libro que pretende proporcionar una descripción global de la gestión de nutrientes. El libro aborda la complejidad científica de cómo la humanidad puede responder a los desafíos ambientales y maximizar las oportunidades de una gestión mejorada de los nutrientes, mostrando la construcción de una red de instituciones y actores para una mejor comprensión científica que apoye la toma de decisiones futuras en este campo. El mensaje del libro es que todo el mundo puede beneficiarse de los nutrientes y contribuir a promover la producción y el uso sostenible de los mismos. Tanto si vivimos en una parte del mundo con demasiados o muy pocos nutrientes, nuestras decisiones diarias pueden marcar la diferencia.

GLOSARIO

Biota. conjunto de todos los seres vivos del planeta.

N reactivo (Nr). Todas aquellas moléculas y/o compuestos de N involucradas directa o indirectamente en el metabolismo.

Deposición atmosférica del N. Entrada de N desde la atmósfera a los ecosistemas, bien en forma de polvo (deposición seca) o disuelto en agua de lluvia y nieve (deposición húmeda).

Escorrentía. Corriente de agua que circula sobre una superficie al rebasar su depósito o cauce naturales o artificiales.

Fijación del N₂. Proceso por el cual el N atmosférico (N₂) se transforma en formas reactivas o disponibles para la biota.

Adenosin trifosfato (ATP). Molécula orgánica que se utiliza en la obtención de energía celular. Está formada, entre otras cosas por una base nitrogenada (adenina; de ahí su nombre) y tres grupos fosfato. Es la principal fuente de energía para la mayoría de las funciones celulares, y está presente en todos los seres vivos.

Descomposición. Proceso de ruptura metabólica de materiales en componentes simples por organismos vivos.

Eutrofización. Proceso de contaminación de sistemas pobres en nutrientes (ej. sistemas acuáticos como lagos, embalses, e inclusive el océano). Ocurre al haber un incremento de nutrientes (ej. fósforo) que promueve el crecimiento acelerado de organismos que consumen el oxígeno y bloquean el paso de luz más allá de la superficie de los cuerpos de agua.

Lixiviación. Fenómeno por el cual las aguas de lluvia o del riego arrastran verticalmente los nutrientes minerales del suelo fuera del alcance del sistema radicular de las plantas, generando pérdida de fertilidad y acidificación de los suelos.

Retrogresión. Concepto utilizado en ecología de ecosistemas que sugiere la vuelta a un estado menos complejo, con menor diversidad, productividad, ciclado de nutrientes, etc.

Producción primaria. Síntesis de compuestos orgánicos a partir de compuestos inorgánicos, principalmente CO₂ (atmosférico o disuelto en agua). La mayor parte de la producción primaria se produce por medio de la fotosíntesis, que usa luz como fuente de energía, pero también por medio de la quimiosíntesis, que usa la oxidación o reducción de compuestos químicos como fuente de energía.

Mineralización del N. Descomposición u oxidación de formas orgánicas que contienen nitrógeno en formas inorgánicas que son utilizables por plantas y microorganismos en su metabolismo.

Nitrificación del N. Proceso aeróbico de oxidación de amoníaco o amonio a nitrito, primero, y nitrito a nitrato después, llevado a cabo por ciertos grupos de bacterias y arqueas.





Nalcas en humedal de Chiloé. La **Nalca** o **Pangue** (*Gunnera tinctoria*) es una planta de amplia distribución en el área templada de Chile y Argentina. Posee peciolo comestible de más de un metro de longitud. Es una planta angiosperma muy especial, pues por un lado posee una de las hojas más grandes en el grupo y por otro es una de las pocas que ha establecido una simbiosis con cianobacterias (alojadas en cavidades en la base de los peciolo) que fijan nitrógeno que usa la planta. Foto Pablo Marquet



¿Sabías que conocemos peor nuestros océanos que la superficie de la luna? Nuestra comprensión del funcionamiento de los océanos y su rol en el control climático de nuestro planeta han aumentado notablemente durante las últimas décadas –la ventana con la cual observamos los océanos es mucho más grande– pero seguimos lejos de describir adecuadamente su funcionamiento. El buque oceanográfico García del Cid, 2018. Foto Agustí Torre

El papel regulador de los océanos en el sistema terrestre

Josep L. Pelegrí, Humberto Marotta, Sergio A. Navarrete y Ananda Pascual

RESUMEN

Aproximadamente el 71% de la superficie del planeta está cubierta por océanos y mares que se encuentran interconectados. A pesar de su importancia, aún desconocemos muchos de los procesos físicos y biogeoquímicos de los océanos y su papel regulador sobre los ecosistemas marinos y terrestres. El objetivo de este capítulo es proporcionar una introducción muchos de los procesos físicos y biogeoquímicos de los océanos, con el énfasis puesto en su capacidad reguladora del ecosistema planetario, en lo que acostumbramos a llamar el estado termodinámico, o clima, de nuestro Planeta. En primer lugar describiremos las principales características de las variables físicas y biogeoquímicas que caracterizan al medio marino, con especial atención a la circulación oceánica y nivel medio del mar, así como a su temperatura, salinidad y nutrientes inorgánicos. A continuación nos centraremos en una de estas propiedades, el carbono, de interés muy especial para comprender el estado actual y posible evolución futura del clima de la Tierra. Concluiremos con unas reflexiones generales sobre la relevancia planetaria de los flujos y transformaciones de masa, energía y vida, y cómo estos flujos están siendo afectados por la actividad humana.

1. La biósfera oceánica

Posiblemente estamos acostumbrados a oír que nuestro planeta, la Tierra, realmente debería llamarse Océano. Efectivamente, una visión desde el espacio nos muestra que aproximadamente el 71% de la superficie del planeta está cubierta por océanos y mares que se encuentran interconectados. Si bien esto es totalmente cierto, existe otra razón aún más poderosa que apoya esta idea: los océanos contienen la mayor parte de los elementos que participan en el ciclo de la vida de nuestro planeta. Estos incluyen elementos mayoritarios –como son la propia agua, el oxígeno disuelto, el carbono inorgánico y los nutrientes inorgánicos biológicamente limitantes (nitrato, fosfato y silicato)– y elementos minoritarios en composición pero que también son fundamentales para que tengan lugar la **fotosíntesis** y la respiración –como pueden ser el hierro, el zinc y el manganeso– en lo que constituye la base de la vida de nuestro planeta.

La abundancia de elementos en el sistema marino hace que la vida misma de nuestro planeta se desarrolle mayormente en esta relativamente delgada capa de agua –la profundidad media de los océanos es de 3,7 km en comparación con los 6.371 km que tiene el radio de la Tierra– en lo que constituye la **biosfera oceánica**. La relevancia planetaria de la biosfera marina es extraordinaria, mucho mayor que la de la biosfera terrestre. Si consideramos que solamente los primeros 10-100 m de corteza terrestre son metabólicamente activos, en contraste con la elevada actividad metabólica que tiene lugar en toda la columna

oceánica, se obtiene que entre el 99,0 y el 99,9% de la masa viva del planeta yace en los océanos. Sabiendo que el **metabolismo** de los seres vivos es proporcional a la masa elevada a una potencia de $2/3^1$, nos lleva a concluir que entre el 95 y 99% de la actividad metabólica de nuestro planeta tiene lugar en los océanos.

Más del 95% de la actividad metabólica de nuestro planeta ocurre en los océanos

Otra peculiaridad del océano es la plena interconexión de los ecosistemas. Si bien es cierto que acostumbramos a hablar de ecosistemas que funcionan a distintas escalas – por ejemplo a lo largo del litoral marino, en una **surgencia** costera o en el interior de un **giro subtropical**– todos ellos están interconectados. Así pues, por ejemplo, las corrientes costeras comunican los diferentes ecosistemas de la plataforma continental², los remolinos que se generan en la plataforma y zonas de **surgencia** se propagan llenos de vida hacia el interior del océano³, y estas aguas interiores se conectan desde zonas tropicales hasta zonas subpolares a través de la **termoclina** permanente⁴. Las conexiones remotas, o **teleconexiones**, se refuerzan por medio de la interacción entre océano y atmósfera a gran escala, ejemplificado en el fenómeno de El Niño y la Oscilación Sur (ENSO), donde la anomalía transoceánica en los vientos crea ondas de alta presión y temperatura que atraviesan todo el Océano Pacífico tropical y causan estragos en las usualmente frías aguas de Perú y Chile⁵. Estas interconexiones, que operan a muy distintas escalas espaciales y temporales, son las que proporcionan la diversidad y estabilidad de la **biosfera oceánica**.

A pesar de su importancia, aún desconocemos muchas de las características físicas y biogeoquímicas de los océanos y su papel regulador sobre los ecosistemas marinos y terrestres. El papel vital del océano en el sistema Tierra adquiere especial relevancia en el actual escenario de cambio global, en tanto que su elevada capacidad reguladora es capaz de amortiguar la intensidad y velocidad de los cambios. De forma natural surge la pregunta de cómo se modificarán los procesos oceánicos a medida que

el sistema evolucione, y de si seremos capaces de anticipar estos cambios y sus efectos sobre el sistema.

El objetivo de este capítulo es proporcionar una introducción a las principales características físicas y biogeoquímicas de los océanos, con el énfasis puesto en su capacidad reguladora del ecosistema planetario, en lo que acostumbramos a llamar el estado termodinámico, o clima, de nuestro Planeta⁶. En primer lugar describiremos las principales características de las variables físicas y biogeoquímicas que caracterizan al medio marino, con especial atención a la circulación oceánica y nivel medio del mar, así como a su temperatura, **salinidad** y nutrientes inorgánicos (sección 2). A continuación nos centraremos en una de estas propiedades, el carbono, de interés muy especial para comprender el estado actual y posible evolución futura del clima de la Tierra (sección 3). Concluiremos con unas reflexiones generales sobre la relevancia planetaria de los flujos y transformaciones de masa, energía y vida, y cómo estos flujos están siendo afectados por la actividad humana (sección 4).

2. Medio marino

La **biosfera oceánica** depende de las características termodinámicas y biogeoquímicas del medio marino. Para describir el estado termodinámico de un fluido de composición constante basta con precisar la distribución de dos variables, que suelen ser la temperatura y la presión. La temperatura nos indica el calor, o energía interna, que se ha almacenado en los océanos. La presión que experimenta una parcela de agua oceánica equivale a la presión atmosférica más el peso de la columna de agua que se encuentra por encima, por lo que también puede interpretarse como una medida integrada del estado del sistema oceánico. En los mares y océanos la composición de las sales disueltas en el agua no es constante, por lo que también es necesario conocer las variaciones de la **salinidad**.

La temperatura, **salinidad** y presión determinan, a partir de la ecuación de estado del agua, la densidad del agua marina. La presión de la columna de agua puede determinarse instrumentalmente pero también puede



Las propiedades termodinámicas del agua determinan su densidad y, junto con la elevación media del mar, la presión. Los gradientes de presión, vientos superficiales y la **fuerza de Coriolis** son los principales forzamientos de las corrientes oceánicas. Las distribuciones de propiedades bioquímicas, como son los nutrientes y carbono inorgánico disuelto, ayudan a completar la imagen de los patrones globales de circulación oceánica. Muestra de agua de mar, análisis de oxígeno disuelto. Foto tomada en el buque oceanográfico García del Cid, 2018. Foto Ananda Pascual.

calcularse a partir de la presión atmosférica, el nivel medio del mar y los valores de densidad en función de la profundidad, es lo que se denomina la relación hidrostática. Si bien la temperatura es generalmente la variable predominante en la determinación de la densidad, hay lugares, como el Mar Mediterráneo, donde la **salinidad** juega un papel clave. La densidad es una variable dinámica de gran importancia no sólo porque determina la estabilidad vertical de la columna de agua (las aguas menos densas se colocan por encima de las más densas) sino en tanto que determina los gradientes de presión y, por tanto, las **corrientes geostróficas**.

Para comprender el funcionamiento de los océanos no basta con conocer el medio físico oceánico, debemos también descifrar su composición química, es decir los elementos inorgánicos y orgánicos que se encuentran en forma disuelta y particulada, y las transformaciones químicas y biológicas que estos elementos experimentan. Por tanto, cualquier aproximación al sistema oceánico requiere una descripción de las distribuciones de los elementos mayoritarios que se encuentran en el sistema marino –carbono y nutrientes orgánicos e inorgánicos– con especial énfasis en aquellos que tienen un **carácter biolimitante**.

2.1 Nivel medio del mar

Prácticamente toda el agua del planeta, alrededor del 97%, se encuentra en los océanos. En una superficie equivalente a la de todos los océanos, el hielo continental disuelto ocuparía 83 m de la columna de agua, el agua de lagos y subsuelo representaría 23 m, y el agua que hay en la atmósfera se extendería apenas 3 cm de altura. La columna de agua equivalente al hielo continental, aunque muy inferior a la profundidad media de los océanos (3.700 m), sí que puede ocasionar cambios muy importantes en el nivel medio del mar. En contraste, la disolución del hielo del casquete polar no puede crear variaciones del nivel medio del mar, por cuanto se trata de hielo flotando sobre agua.

En la historia reciente de nuestro planeta el nivel medio del mar ha cambiado cíclicamente como parte de la variabilidad natural del sistema terrestre, es lo que se denomina un **ciclo glacial-interglacial**. Actualmente no hay grandes masas de hielo en los continentes, excepto en el Antártico, pero esto no ha sido siempre así: la Tierra ha experimentado periodos interglaciales como el actual, y periodos glaciales donde la cantidad de hielo continental era mucho mayor. A finales del Plioceno, hace unos tres millones de años, los máximos glaciales se tornaron cíclicos y se intensificaron, con regiones heladas que periódicamente cubrían grandes extensiones del hemisferio norte, desde el polo y alcanzando prácticamente hasta 40°N. Esta ciclicidad se ha mantenido durante todo el Pleistoceno, hasta la actualidad, inicialmente con una periodicidad de unos 40 ka (1 ka = 1.000 años) pero posteriormente, desde hace unos 800 ka, con periodos de aproximadamente 100 ka. Los ciclos actuales tienen una fase glacial larga, de unos 80 ka, durante la cual la temperatura media del planeta decrece progresivamente, se forman hielos continentales y el nivel medio del mar baja, y una fase interglacial corta, de unos 20 ka, durante la cual la temperatura, glaciares continentales y nivel del mar recuperan sus niveles iniciales.

La Tierra se encuentra ahora, como parte de su ciclo natural, en el máximo de una época interglacial. Esto hace que la mayor parte del hielo continental (excepto el Antártico) se

haya derretido y el nivel del mar haya subido unos 125 m por encima del nivel medio que tenía durante los máximos glaciales. Este proceso de deshielo, que se inició hace unos 20 ka, ha cubierto de agua las zonas donde se acumulan los sedimentos terrestres, que constituyen ahora las plataformas continentales. El hielo que queda en el resto de los continentes se encuentra en la Antártica y en Groenlandia, con aproximadamente 30 y 3 millones de metros cúbicos, respectivamente⁷.

Actualmente el nivel medio del mar aumenta a una tasa que triplica los valores máximos observados en la historia reciente de nuestro planeta

Un **ciclo glacial-interglacial** forma parte de la variabilidad natural del sistema terrestre, que se produce sin ningún **efecto antropogénico**. Sin embargo, desde la revolución industrial, en poco más de 200 años, la especie humana ha demostrado una gran capacidad para alterar estos ciclos de distintas maneras, tales como mediante un aumento acelerado del nivel del mar. Esto ocurre fundamentalmente por el aumento de la temperatura del agua, que por tanto se expande, y también por el deshielo de las masas de hielo continental. El hielo antártico no parece haberse reducido significativamente pero si lo ha hecho el hielo que cubre Groenlandia, cuya extensión durante el verano boreal ha disminuido en alrededor de un 30% entre 1979 y 2006. Si todo el hielo contenido en Groenlandia se llegase a derretir se estima que el nivel medio del mar podría llegar a subir hasta 6 m. El resultado es que el nivel medio del mar aumenta en promedio unos 3 mm por año⁸, triplicando así los valores máximos que de modo natural han ocurrido durante la historia reciente de la Tierra.

2.2 Reservorio de energía: la circulación oceánica

La cantidad de energía contenida en los océanos es tres órdenes de magnitud superior a la que se encuentra en la

atmósfera. Así pues, los dos o tres metros más superficiales de los océanos contienen tanto calor como toda la atmósfera. Esto se debe a que la capacidad del agua para almacenar energía por unidad de volumen es unas 3.000 veces superior a la del aire. Ello hace que, para aumentar la temperatura en 1°C, se requiera la misma energía para los tres primeros metros de los océanos que para toda la atmósfera del planeta.

Los océanos no solo tienen una gran capacidad de almacenar energía, son también en gran parte responsables de la distribución de esta energía desde las regiones tropicales, donde llega mayor radiación solar de la que se emite, hacia las regiones templadas y subpolares, donde la radiación emitida supera ampliamente a la recibida⁹. Gran parte de esta transferencia ocurre como resultado de la **circulación termoclina**, que conecta las aguas superficiales de altas latitudes con las aguas subsuperficiales de latitudes bajas, dando lugar a la estructura vertical térmica de los océanos: las aguas disminuyen su temperatura linealmente con la profundidad de modo similar a la disminución con la latitud. Por su parte, la **circulación meridional profunda** o cinta transportadora global¹⁰, hace otro tanto pero en una celda vertical que tarda centenares de años y abarca toda la columna de agua, desde la superficie hasta profundidades medias de unos 4.000-5.000 m. En cierto modo, la **circulación termoclina** y meridional profunda juegan el papel de circuitos pulmonar y sistémico de un ser vivo, con el circuito pulmonar responsable del intercambio de gases y calor con la atmósfera y el circuito sistémico encargado de suplir elevados niveles de nutrientes inorgánicos.

Además de los patrones de circulación a gran escala, en los océanos se aprecia toda una gama de movimientos a escalas temporales y espaciales más pequeñas. Uno de los movimientos más energéticos tiene lugar en la **mesoescala** –como frentes, meandros y remolinos– equivalente a los procesos sinópticos atmosféricos. Las escalas típicas espaciales de las estructuras de **mesoescala** son de entre 10 y 200 km, mientras que las temporales suelen estar comprendidas entre 1 semana y varios meses. La altimetría por satélite ha supuesto una revolución en la observación de las estructuras de **mesoescala** a escala global¹¹, que tienen un papel fundamental en la modulación del clima mediante los intercambios de

calor, agua dulce y carbono. Por primera vez es posible monitorizar de forma periódica y sinóptica la energía asociada a frentes y remolinos e investigar las relaciones entre procesos físicos y biológicos de la superficie de los océanos¹². Estas relaciones son clave para entender y predecir cómo el océano y los ecosistemas marinos responden a cambios en el sistema climático. Aunque las nuevas tecnologías de sensores remotos y vehículos autónomos ha permitido un avance espectacular, todavía existen numerosas incógnitas sobre los mecanismos que explican esas interacciones, en especial su relación con los procesos que tienen lugar a escalas más pequeñas (entre centenares de metros y varios kilómetros, conocidos como de **submesoescala**).

Alrededor del 90% del incremento de energía en la Tierra como resultado del efecto antropogénico ha ido a los océanos

La conjunción de todas estas características convierten a los océanos en los verdaderos reguladores de la distribución de la energía en el sistema terrestre. Nuestro planeta no ha experimentado aún cambios dramáticos de temperatura gracias a que cerca del 90% del incremento de calor por efectos antropogénicos – tanto directamente como resultado de la quema de combustibles fósiles, como el carbón o el petróleo, o indirectamente por aumento de los gases de **efecto invernadero** – se ha ido a los océanos. Los cambios en la temperatura de los océanos se iniciaron alrededor de 1950, aunque con distinta intensidad a diferentes profundidades. Mientras que las aguas superficiales se calientan a una tasa de 0,1°C por década, la temperatura de las aguas que se encuentran por debajo los 2.000 m aumenta a una tasa de apenas 0,05°C por década.

2.3 Reservoirio de agua dulce: el ciclo hidrológico

El océano también es clave en el ciclo hidrológico. Aunque sabemos que el océano contiene la mayor parte del agua de nuestro planeta, aproximadamente el 97% del total, a





Foto aérea de la isla de Gran Exuma, Bahamas. Derechos Reservados bajo Creative Commons CC0



Para mejorar nuestro conocimiento de los océanos es necesario un continuo esfuerzo de observación y monitoreo, que incluye campañas oceanográficas, estaciones de monitoreo, equipos autónomos y a la deriva instrumentados, sensores remotos y modelos numéricos. La imagen muestra la operación de recogida de una roseta durante una campaña oceanográfica del buque García del Cid. Foto Ananda Pascual

veces no somos conscientes de su capacidad de regular los flujos de agua dulce a escala planetaria. El agua dulce que entra a los océanos –resultado de precipitación, evaporación y descarga de los ríos– es alrededor del 80% del flujo de agua que existe entre el océano y la atmósfera¹³. Esta agua dulce debe después ser distribuida entre las distintas regiones del globo, de nuevo mediante las corrientes **termoclina** y profundas, con un transporte neto de aproximadamente un millón de metros cúbicos por segundo desde las altas latitudes hacia las bajas latitudes, es decir desde regiones donde la pluviosidad excede a la evaporación hacia regiones donde la situación es la opuesta¹⁴.

El ciclo hidrológico está fuertemente influenciado por los cambios de fase del agua, en cuanto que requieren o liberan mucho calor. Por ejemplo, la energía necesaria para aumentar la temperatura de 3 m de agua en 1°C puede apenas derretir 30 mm de hielo o evaporar 4 mm de agua hacia la atmósfera. Sin embargo, 4 mm de agua evaporada de todos los océanos representan nada menos que la sexta parte de toda el agua que ya hay en la atmósfera. Así, un aumento en la temperatura de la superficie del mar llevaría a tasas de evaporación levemente mayores pero ocasionaría grandes

consecuencias en el ciclo hidrológico del planeta. Si bien la evaporación responde de forma bastante lineal al aumento de la temperatura, no ocurre lo mismo con la precipitación, que puede experimentar importantes fluctuaciones entre sequías e intensas lluvias. Por tanto, al calentamiento de origen antropogénico vendrá asociado un aumento en la precipitación a escala global, pero este no ocurrirá de forma homogénea: en zonas tropicales (como la región Amazónica) la pluviosidad aumentará mucho mientras que en zonas templadas (como España, Chile o Argentina) las situaciones de sequía serán más frecuentes.

Las predicciones de futuros escenarios climáticos son de gran dificultad. Esto se debe a la complejidad del sistema climático, con multitud de interacciones y retroalimentaciones que ocurren principalmente entre el océano, la criosfera y la atmósfera. Por ejemplo, las corrientes oceánicas, al redistribuir el calor y alterar los flujos de energía entre el océano y la atmósfera, modifican la humedad atmosférica y la presión en las capas bajas de la atmósfera. Como resultado se producen vientos superficiales que inciden directamente en la generación de corrientes. Sin embargo, esto es solo parte



Las regiones frontales son especialmente ricas en producción primaria. La foto, tomada desde el buque oceanográfico Hespérides, ilustra multitud de aves alimentándose en la región de Confluencia de Brasil-Malvinas, donde las aguas frías y ricas en nutrientes de la Corriente de Malvinas se encuentran con las aguas cálidas del giro subtropical del Atlántico Sur. Foto José Luis Pelegri

de la historia. Las corrientes también transportan el exceso o defecto de agua dulce –como resultado de su interacción con la atmósfera– las cuales afectan el nivel medio del mar y, sobre todo, los patrones de **salinidad** superficial oceánica. Los cambios en temperatura y **salinidad** superficial modifican la densidad de las aguas superficiales que, junto con el nivel del mar, determinan los campos de presión. Estos campos de presión, junto con los vientos en superficie, son los principales mecanismos responsables de las corrientes oceánicas.

Estas interacciones y las características propias de cada región de la tierra y de los océanos generan ambientes extremadamente heterogéneos en donde las tendencias locales o regionales pueden ser muy distintas a los promedios globales. Un ejemplo de especial relevancia son los vientos alisios, responsables de la **surgencia** de aguas sub-superficiales frías, que tiene lugar en los márgenes orientales de todos los giros subtropicales, tales como en las costas de Perú y gran parte de Chile así como en la Península Ibérica y la Cuenca de Canarias. Estos vientos pueden aumentar como resultado del aumento en temperatura de la tierra (y consiguiente disminución de presión) con respecto al océano¹⁵. La intensificación de los vientos refuerza la **surgencia**,

con la consiguiente disminución de la temperatura del océano costero superficial¹⁶ y de la capa atmosférica superficial cercana a la costa, en contraste con la tendencia global.

Los ejemplos anteriores muestran que, para anticipar la evolución futura del sistema terrestre, debemos mejorar nuestra capacidad de comprender, por un lado, los mecanismos de interacción entre océano y atmósfera y, por otro lado, la capacidad que océano y atmósfera tienen para transportar energía y agua dulce. Solo identificando los mecanismos y procesos es que podremos comprender qué parte de la variabilidad del sistema corresponde a efectos antropogénicos.

2.4 Reservorio de nutrientes: producción primaria

El océano no solo almacena mucho más calor que la atmósfera, también contiene grandes cantidades de nutrientes inorgánicos, necesarios para la producción primaria, o síntesis de compuestos orgánicos a partir del dióxido de carbono o el carbono inorgánico disuelto en agua. El principal proceso de producción primaria es el

de la **fotosíntesis**, que tiene como fuente energética la energía solar. De hecho, nuestro planeta debe considerarse como un sistema fundamentalmente autotrófico, donde los productores primarios constituyen la base de la cadena trófica. Aproximadamente la mitad de la producción primaria planetaria tiene lugar en los océanos.

En el medio marino, la **fotosíntesis** solo puede tener lugar en la **zona fótica** cuando existen unas concentraciones mínimas de tres nutrientes inorgánicos: nitratos, fosfatos y silicatos. Como resultado de la **fotosíntesis**, el carbono y los nutrientes inorgánicos se transforman en materia orgánica, causando un decaimiento de los nutrientes inorgánicos hasta el extremo de limitar la actividad fotosintética (el carbono inorgánico nunca es limitante simplemente porque entra a las capas superficiales directamente desde la atmósfera). Por tanto, la **fotosíntesis** sólo se mantiene activa si existe un continuo suministro de estos nutrientes inorgánicos hacia la capa fótica.

Los nutrientes inorgánicos que alcanzan las capas superficiales oceánicas pueden provenir de fuentes terrestres (fundamentalmente el aporte de ríos) y, principalmente, marinas. Los principales aportes marinos provienen de las aguas sub-superficiales, en regiones de mezcla vertical o **surgencias**. Estas aguas profundas tienen su origen, más o menos lejano, en las propias capas superficiales que, al hundirse, llevan consigo la materia orgánica allí producida como resultado de la **fotosíntesis**. En las aguas sub-superficiales no hay insolación y por tanto la producción primaria cesa y la materia orgánica se remineraliza, con el consiguiente aumento en las concentraciones de nutrientes inorgánicos a medida que estas aguas se alejan de las regiones de hundimiento.

Como resultado de los procesos de **remineralización**, las aguas sub-superficiales alcanzan –al cabo de unos años de tránsito en la **termoclina** o de centenares de años de **circulación meridional profunda**– elevadas concentraciones de nutrientes inorgánicos antes de regresar a la superficie del océano. Este retorno puede ocurrir como resultado de la intensa mezcla vertical que ocurre en invierno, que es cuando la **capa de mezcla** superficial

alcanza sus valores máximos, o también por la presencia de regiones de **surgencia**, donde el agua fluye hacia la superficie inducida por los vientos o por la liberación de su propia energía¹⁷. El retorno de estas aguas implica flujos de nutrientes muy elevados, que en el margen occidental de los grandes giros subtropicales llega a alcanzar valores del orden de 1000 kilomoles de nitrato por segundo¹⁸. También en el océano ecuatorial se aprecia este reflujo, ya como consecuencia de los tramos finales de la **circulación meridional profunda**¹⁹. Los procesos de mesoescala y **submesoescala** también desempeñan un papel crucial en el transporte de nutrientes, siendo especialmente relevantes por cuanto sus escalas temporales son similares a las del crecimiento del fitoplancton. En los procesos de **mesoescala** las velocidades verticales típicas son del orden de 1-10 m/día mientras que las velocidades asociadas a estructuras de **submesoescala** pueden llegar a 100 m por día²⁰.

El sistema de circulación oceánica regula el flujo de nutrientes inorgánicos para mantener la producción primaria por fotosíntesis

La llegada de aguas subsuperficiales a la capa fótica conlleva un flujo de nutrientes inorgánicos que sostiene la producción primaria, de allí que a las **surgencias** también se les llame afloramientos. El sistema de circulación oceánica, donde el agua superficial se hunde para eventualmente volver a la superficie cargada de nutrientes inorgánicos, se torna en una eficiente maquinaria que mantiene la vida del Planeta.

3. La bomba oceánica de carbono

Uno de los elementos claves en el sistema terrestre es el carbono, que en la atmósfera se encuentra fundamentalmente en forma de dióxido de carbono (CO₂). Al igual que ocurre con los nutrientes, como resultado de los procesos de **remineralización**, la concentración en carbono inorgánico en las aguas profundas es superior a la de las aguas superficiales. Sin embargo, el carbono no es

un elemento biológicamente limitante: en la **zona fótica** el carbono siempre se encuentra en abundancia proveniente de los gases atmosféricos.

El CO₂ representa una pequeña parte de la atmósfera pero con una notable influencia sobre el clima del planeta. El CO₂ atmosférico es capaz de incorporar la energía que la Tierra irradia en la banda infrarroja, aumentando su tasa de vibración, para después en gran parte irradiarla de regreso hacia la superficie de la Tierra: es lo que se denomina el **efecto invernadero**, cuyo resultado final es el aumento de la temperatura de nuestro planeta. El incremento en las emisiones de CO₂ ha ocasionado que la concentración del carbono atmosférico haya pasado de 280 a 400 partes por millón en volumen (ppm) desde la revolución industrial, incrementando el **efecto invernadero** y contribuyendo al calentamiento del planeta. Sin embargo, el aumento de CO₂ atmosférico no refleja la cantidad de carbono producido por **efecto antropogénico** pues alrededor del 40% de las emisiones de carbono antropogénicas han ido a los océanos.

En diversas ocasiones a lo largo del pasado geológico de nuestro planeta, las concentraciones de CO₂ atmosférico han sido mucho más elevadas que las actuales, lo que ha moldeado la vida en el planeta. Sin embargo, estos cambios entre distintos niveles de CO₂ siempre han ocurrido de forma paulatina, como por ejemplo durante las transiciones entre épocas glaciales e interglaciales²¹. La humanidad, principalmente como resultado de la quema de combustibles fósiles y los procesos de deforestación, ha ocasionado que actualmente el CO₂ aumente a unas tasas muy superiores a las observadas a lo largo de toda la historia del planeta.

Los océanos desempeñan un papel fundamental como regulador de las concentraciones atmosféricas de carbono²². Así pues, el océano contiene 70 veces más carbono inorgánico que la atmósfera, para un total del 87% del carbono accesible del planeta, que incluye los sedimentos más reactivos pero excluye a la corteza terrestre²³. Esto hace que las concentraciones de CO₂ atmosférico sean, en gran medida, un reflejo de las concentraciones del carbono en los océanos. El equilibrio océano-atmósfera es el resultado de una serie de procesos que incluyen dos

tipos de mecanismos de captación de carbono atmosférico hacia los océanos: las bombas biológica y de solubilidad, respectivamente mediadas y no mediadas por los seres vivos²⁴. Ambas bombas convierten a las aguas y los sedimentos marinos^{25,26} en sumideros efectivos de carbono a distintas escalas temporales.

Los océanos contienen el 87% del carbono accesible del planeta

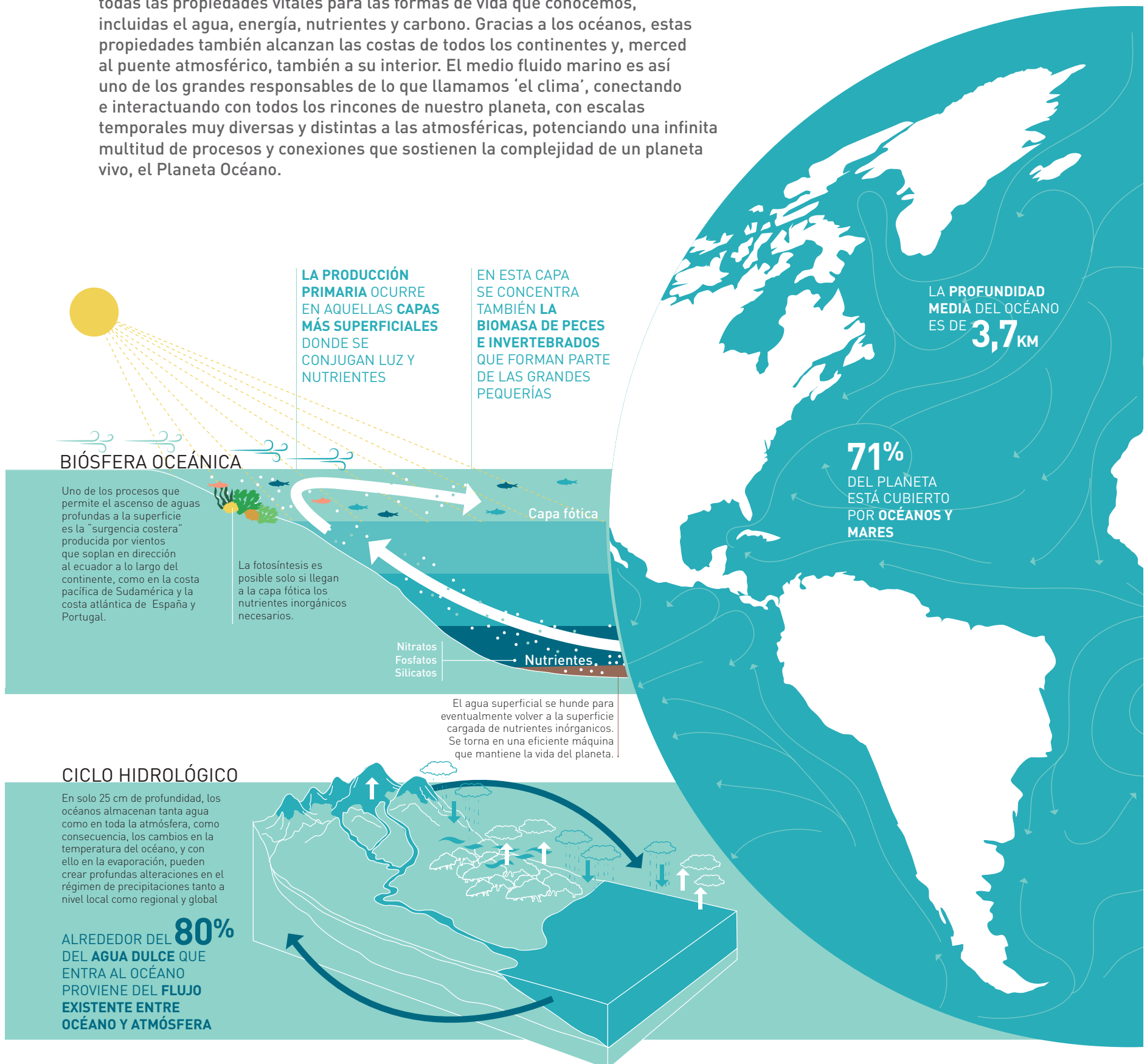
3.1 La bomba biológica de carbono

La bomba biológica es causada por la actividad de organismos que producen biomasa a partir de la incorporación de CO₂, usando la energía derivada de la radiación solar (**fotosíntesis**) o de determinadas reacciones químicas (quimiosíntesis). Como resultado de esta bomba se produce materia orgánica que se encuentra disuelta o particulada en el agua, incorporada a los sedimentos y/o convertida en rocas (diferentes tipos de carbón) o hidrocarbonatos líquidos o pastosos (como petróleo o bitumen). Algunos organismos también pueden incorporar carbono en estructuras constituidas predominantemente por carbonato de calcio, como son la calcita y aragonita, que utilizan para su sustentación y protección. A pesar de ser producidas por la biota marina, estas estructuras carbonatadas no pueden ser utilizadas por los organismos vivos como fuente de energía a partir de su degradación.

El balance biológico entre los organismos marinos que son fijadores (autotróficos) y liberadores (heterotróficos) netos de carbono determina si las aguas oceánicas son sumidero o fuente de carbono atmosférico²⁷. Los organismos autotróficos incluyen microorganismos fotosintéticos o quimioautotróficos, macroalgas y otras plantas marinas específicas de aguas someras, mientras que los heterotróficos incluyen los microorganismos involucrados en la descomposición de materia orgánica, los hongos y los animales marinos. Las aguas que se encuentran en la **zona fótica** presentan producción autotrófica basada en la **fotosíntesis**, mientras que las aguas más profundas son zonas de **remineralización** de la materia orgánica muerta por medio del **metabolismo**

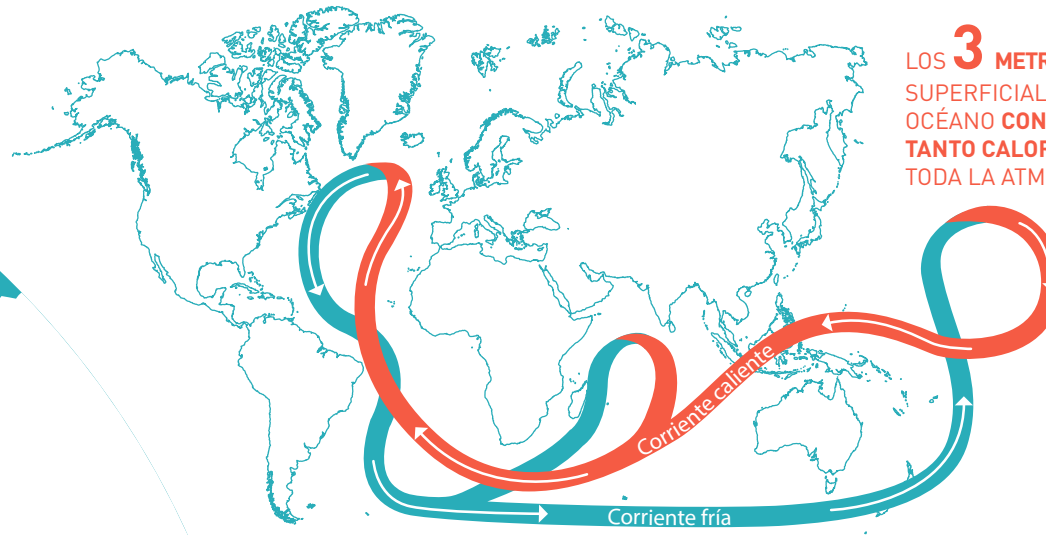
LOS OCÉANOS COMO REGULADORES DEL EQUILIBRIO PLANETARIO

La capacidad reguladora de nuestros mares y océanos es extraordinaria. Ellos son los principales responsables de almacenar, transformar y distribuir todas las propiedades vitales para las formas de vida que conocemos, incluidas el agua, energía, nutrientes y carbono. Gracias a los océanos, estas propiedades también alcanzan las costas de todos los continentes y, merced al puente atmosférico, también a su interior. El medio fluido marino es así uno de los grandes responsables de lo que llamamos 'el clima', conectando e interactuando con todos los rincones de nuestro planeta, con escalas temporales muy diversas y distintas a las atmosféricas, potenciando una infinita multitud de procesos y conexiones que sostienen la complejidad de un planeta vivo, el Planeta Océano.



LA CINTA TRANSPORTADORA GLOBAL

LOS HIELOS QUE QUEDAN EN LA ANTÁRTICA Y GROENLANDIA SE HAN REDUCIDO EN UN **30%** ENTRE 1979 Y 2006



LOS **3** METROS SUPERFICIALES DEL OCÉANO CONTIENEN TANTO CALOR COMO TODA LA ATMÓSFERA

90% DEL CALOR DEL PLANETA ES ABSORBIDO POR EL OCÉANO

Las aguas superficiales y profundas del océano global están conectadas por medio de un sistema circulatorio planetario que denominamos cinta transportadora global o circulación meridional profunda. Las aguas superficiales se sumergen a altas

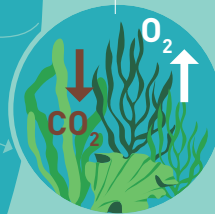
latitudes del Océano Atlántico y circulan lentamente por todas las cuencas oceánicas, conectadas por medio de la Corriente Circumpolar Antártica, antes de regresar a las regiones de hundimiento al cabo de centenares e incluso miles de años.

BOMBA OCÉANICA DE CARBONO

99% DE LA MASA VIVA DEL PLANETA YACE EN EL OCÉANO

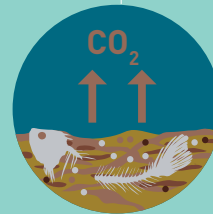
97% DEL AGUA TOTAL DEL PLANETA SE ENCUENTRA EN LOS OCÉANOS

BOMBA BIOLÓGICA



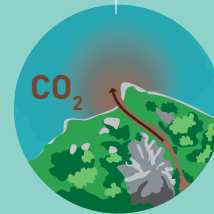
Fotosíntesis y quimiosíntesis

Los organismos producen biomasa a partir de la incorporación de CO_2 , usando la energía derivada de la radiación solar (fotosíntesis) o de determinadas reacciones químicas (quimiosíntesis).



Metabolismo heterotrófico

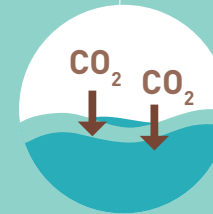
Los organismos marinos autotróficos son aquellos que fijan más carbono del que liberan, y lo contrario para los heterotróficos. El resultado neto de ambos tipos determina si las aguas oceánicas son sumidero o fuente de carbono atmosférico.



Aporte desde el continente

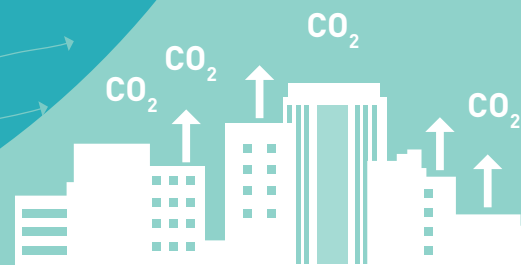
Como resultado del aporte de nutrientes inorgánicos desde los continentes, las regiones costeras usualmente tienen producción autotrófica neta, mientras que en el océano abierto prevalece la producción heterotrófica neta.

BOMBA DE SOLUBILIDAD



Bomba física y de solubilidad

La bomba de solubilidad del océano es el resultado de las diferentes presiones parciales de CO_2 en los dos fluidos en contacto (atmósfera y océano) y de la capacidad físicoquímica del CO_2 para reaccionar con el agua.



40% DEL CO_2 ANTROPÓGENICO VA A DAR AL OCÉANO

HA HABIDO UN **43%** DE AUMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE CO_2 ATMOSFÉRICO DESDE LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

heterotrófico. Sin embargo, también en profundidad (sin radiación solar), especialmente donde hay aportes de elementos químicos desde el interior de la corteza terrestre (hidrotermales), los organismos quimioautotróficos pueden convertir el carbono inorgánico en orgánico²⁸. En general, las aguas marinas superficiales en la zona costera comúnmente presentan producción autotrófica neta, subsidiada por el aporte de nutrientes inorgánicos desde los continentes, mientras que en el mar abierto, por la limitación de estos nutrientes, prevalece la producción heterotrófica neta.

3.2 La bomba de solubilidad de carbono

En contraste con la bomba biológica, la bomba de solubilidad del océano actúa sin intermediación de los seres vivos, simplemente como resultado de las presiones parciales de CO_2 en los dos fluidos en contacto (atmósfera y océano) y de la capacidad físico-química que tiene el CO_2 para reaccionar con el agua.

El primer mecanismo –al cual con frecuencia se le denomina bomba física– está controlado principalmente por la temperatura del agua en superficie. Debido a la rápida circulación atmosférica, el tiempo medio de residencia de las masas de aire en la tropósfera es de sólo varias semanas por lo que, a los efectos del sistema climático terrestre, la concentración de CO_2 en las capas bajas de la atmósfera se puede considerar como prácticamente uniforme. En contraste, el tiempo de residencia de las aguas oceánicas es del orden de 10 años para las aguas **termoclinas** y 1000 años para las aguas profundas, lo cual ocasiona importantes gradientes espaciales de temperatura. Como la presión parcial de CO_2 en el océano es casi linealmente proporcional a la temperatura del agua, el carbono inorgánico disuelto (y por tanto el CO_2) en los océanos es bastante mayor en las aguas cálidas que en las frías, con el consecuente flujo desde el océano hacia la atmósfera en las regiones tropicales (*outgassing*) y en dirección contraria en las subpolares (*ingassing*).

El segundo mecanismo de la bomba de solubilidad depende de los cambios en la concentración de carbonato

cálcico (CaCO_3) disuelto en el océano, por lo que a veces a este mecanismo se le da el nombre de bomba química o de carbonatos. El carbono inorgánico en el océano se encuentra disuelto en una combinación de CO_2 , ácido carbónico H_2CO_3 , bicarbonato HCO_3^- (dominante en las condiciones actuales) y carbonato $\text{CO}_3^{=}$. La concentración de estas distintas especies de carbono inorgánico disuelto (dissolved inorganic carbon, DIC) es función de la reactividad físico-química del CO_2 con la molécula de agua, y a la relación de equilibrio entre las tres formas se denomina **sistema carbonato**. A la combinación en el agua de H_2CO_3 y CO_2 se le suele denominar CO_2 libre, el cual se intercambia con la atmósfera en función de su concentración y la concentración del CO_2 atmosférico. En contraste, las otras formas químicas (HCO_3^- y $\text{CO}_3^{=}$) almacenan el carbono en el agua. En particular, el H_2CO_3 presenta la tendencia a mantenerse en ambientes ácidos (donde ya hay otros elementos que liberan cationes H^+), de modo que la cantidad relativa de las tres formas de DIC en el agua (CO_2 libre, HCO_3^- y $\text{CO}_3^{=}$) viene determinada no solo por las características físicas (temperatura y presión) sino también por su acidez (pH) y **salinidad**.

Una conclusión general es que la bomba de solubilidad hace que las aguas básicas, frías y profundas (mayor presión) capturen más carbono que las cálidas, ácidas y someras (menor presión), un balance dinámico que afecta al clima global²⁹. En particular, el carbonato cálcico CaCO_3 es un compuesto que libera radicales base, de modo que un aumento del CaCO_3 disuelto aumenta la alcalinidad de los océanos (se vuelven menos ácidos), afecta la partición del carbono inorgánico disuelto (entre CO_2 libre, bicarbonato HCO_3^- , y carbonato $\text{CO}_3^{=}$) y conduce al secuestro de CO_2 atmosférico. Por el contrario, el incremento en CO_2 atmosférico aumenta la producción de H_2CO_3 , lo cual contribuye a bajar el pH del agua de mar con la consiguiente disminución del número de radicales base producidos por el CaCO_3 , de modo que disminuye la capacidad de captar CO_2 atmosférico. Por tanto, la acidificación de las aguas convierte las formas disueltas de HCO_3^- y $\text{CO}_3^{=}$, las estructuras de carbonato de organismos marinos y los



Los océanos almacenan grandes cantidades de las propiedades fundamentales para un sistema vivo, incluido el carbono, actuando como gran regulador del sistema terrestre. La foto ha sido tomada desde el buque oceanográfico Hespérides en el Canal de Beagle, que une las aguas de los Océanos Atlántico y Pacífico. Foto José Luis Pelegri

diferentes tipos de rocas carbonatadas depositadas en los fondos marinos a CO_2 libre, que es emitido desde la interface aire-agua hacia la atmósfera.

3.3 Disolución, remineralización y flujos netos de carbono

El carbono fijado en el océano mediante la bomba biológica $-\text{CO}_2$ libre transformado en carbono orgánico— puede ser reconvertido a formas inorgánicas volátiles mediante procesos de **remineralización**, producto de la respiración tanto de organismos heterotróficos como autotróficos, y de disolución de carbonatos por procesos físico-químicos. Por otra parte, las condiciones físico-químicas del agua no solo controlan las dos bombas (biológica y de solubilidad) sino que también influyen en la actividad metabólica³⁰. Se trata de un proceso complejo

con retroalimentaciones positivas y negativas, cuyo resultado es que el carbono se almacena en el océano por escalas de tiempo muy variadas: la biomasa puede mantenerse como materia orgánica lábil o recalcitrante, con tiempos de residencia que van desde días hasta miles de años³¹, mientras que los carbonatos permanecen como rocas durante periodos geológicos.

En el período más reciente de la historia geológica del planeta, las actividades humanas han modificado tanto los depósitos de carbono como la intensidad de las propias bombas biológica y de solubilidad. La cantidad de materia orgánica en el propio océano y su sustrato ha cambiado como resultado de la rápida utilización de las materias-primas (combustibles fósiles y caliza) que se encuentran en los depósitos marinos³² y por las alteraciones físico-químicas del agua que afectan los organismos, especialmente el aumento de



la temperatura y la reducción de pH³³. Por otro lado, el aumento en temperatura, por la emisión de gases tipo invernadero incluido el propio CO₂, favorece tanto el proceso de captura como el de **remineralización** del carbono orgánico. Hay todavía incertidumbre sobre si los escenarios de cambio climático por calentamiento favorecerán más la fijación o la liberación biológica de carbono. Sin embargo, las observaciones a gran escala indican que está ocurriendo una reducción neta de la bomba biológica en los ecosistemas marinos³⁴.

4. Equilibrio homeostático y perturbaciones antropogénicas

La Tierra es probablemente el mejor ejemplo posible de un sistema que se encuentra en **equilibrio homeostático**, resultado de la evolución a lo largo de unos 3.500 millones de años de vida en el planeta. El estado actual de la Tierra es el resultado de las fuerzas vivas que habitan en ella^{35,36,37}, en contraste con la idea de que la vida se ha adaptado a las condiciones terrestres. La estabilidad de la Tierra yace en su complejidad, que incluye tanto su biodiversidad como la interacción entre todos sus subsistemas a muy diversas escalas temporales.

El océano es uno de sus subsistemas, probablemente el más fundamental en tanto que almacena grandes cantidades de propiedades fundamentales para la homeóstasis de la Tierra, es capaz de distribuir estas

Los océanos constituyen un verdadero sistema circulatorio en nuestro planeta, captando la energía solar y distribuyéndola eficientemente a todas las partes del sistema. Es un sistema que se nutre de las aguas profundas e intercambia gases con la atmósfera. La foto, tomada por Josep L. Pelegrí en el Atlántico sur, muestra el sol poniente sobre el planeta Océano. Foto José Luis Pelegrí

propiedades a escalas locales y globales, e interacciona estrechamente con los otros subsistemas (litosfera, criosfera y atmósfera). Los océanos son verdaderamente el sistema circulatorio de nuestro planeta, con circuitos equivalentes al pulmonar (termoclino) y sistémico (meridional profundo) de los mamíferos³⁸. Estos circuitos tienen la capacidad de redistribuir propiedades desde aquellas regiones donde se reciben o generan hacia otras regiones deficitarias, como son la energía solar, incorporada en el ecuador y trópicos y transportada hacia regiones templadas-subpolares, y los nutrientes inorgánicos, remineralizados en aguas profundas y transferidos hacia la **zona fótica**. Al igual que en el sistema circulatorio de otros seres vivos complejos, la circulación oceánica lo consigue gracias a estructuras espaciales tipo árbol, con corrientes intensas globales que se fraccionan en estructuras progresivamente más pequeñas hasta un límite donde la difusión molecular ya es más efectiva, y patrones temporales pulsátiles con intervalos relativamente largos donde la circulación se ralentiza y la energía se almacena en forma de materia orgánica disuelta e intervalos cortos de rápida circulación y utilización de la energía almacenada^{38,39}.

La Tierra es un sistema que a lo largo de su historia ha pasado por muchos estados distintos, y que desde finales del Plioceno está dominada por una alternancia entre épocas interglaciales como la actual, donde hay una incorporación y distribución de la energía solar, y épocas glaciales significativamente más frías. La capacidad reguladora de los océanos es extraordinaria pero eso no quiere decir que vaya a mantener al sistema en un estado de equilibrio imperturbable. Todo lo contrario, es un equilibrio dinámico que responde a los forzamientos externos y se auto-ajusta para optimizar, de forma global, el flujo de energía y otras propiedades. La raza humana ahora amenaza con romper la alternancia natural experimentada durante los últimos tres millones de años e incluso en llevar al sistema terrestre hacia un nuevo estado metabólico, posiblemente más cálido y lleno de sorpresas desapacibles⁴⁰. Todos y cada uno de nosotros tenemos en nuestras manos la posibilidad y el deber de evitarlo, con pequeños gestos diarios, individuales y comunitarios, y exigencias responsables a nuestros gobernantes.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 West, G.B. *et al.* Why does metabolic rate scale with body size? *Nature* 421, 713 (2003).
- 2 Aiken, C.A., Navarrete, S.A. & Pelegrí J.L. Potential changes in larval dispersion and along-shore connectivity in the central Chilean coast due to an altered wind climate. *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences* 116, G04026 (2011).
- 3 Pelegrí, J.L. *et al.* Coupling between the open ocean and the coastal upwelling region off Northwest Africa: Water recirculation and offshore pumping of organic matter. *Journal of Marine Systems* 54, 3-37 (2005).
- 4 Pelegrí, J.L., Marrero-Díaz, A. & Ratsimandresy, A.W. Nutrient irrigation of the North Atlantic. *Progress in Oceanography* 70, 366-406 (2006).
- 5 Sheinbaum, J. Current theories on El Niño-Southern oscillation: A review. *Geofísica Internacional* 42, 291-305 (2005).
- 6 Pelegrí, J.L., Alonso, I. & Arístegui, J. The ocean, our climate and the Earth's health. *Scientia Marina* 65(S1), 3-5 (2001).
- 7 National Snow and Ice Data Center. State of the cryosphere: ice sheets (2015). Sacado de https://nsidc.org/cryosphere/sotc/ice_sheets.html el 15 abril de 2016.
- 8 Rhein, M. *et al.* Observations: Ocean. In: *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, United Kingdom and New York, NY, USA (2013).
- 9 Von der Haar, T.H. & Oort, A.H. New estimate of annual poleward energy transport by northern hemisphere oceans. *Journal of Physical Oceanography* 3, 169-172 (1973).
- 10 Talley, L. Closure of the global overturning circulation through the Indian, Pacific, and Southern Oceans: schematics and transports. *Oceanography* 26, 80-97 (2013).
- 11 Pascual, A., Faugère, Y., Larnicol, G. & Le Traon, P.Y. Improved description of the ocean mesoscale variability by combining four satellite altimeters. *Geophysical Research Letters*, 33 L02611 (2006).
- 12 Ruiz, S. *et al.* Vertical motion in the upper ocean from glider and altimetry data. *Geophysical Research Letters* 36, L14207 (2009).
- 13 Durack, P.J., Wijffels, S.E. & Matear, R.J. Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000. *Science* 336, 455-458 (2012).
- 14 Talley, L.D. Freshwater transport estimates and the global overturning circulation: Shallow, deep and throughflow components. *Progress in Oceanography* 78, 257-303 (2008).
- 15 Bakun, A. *et al.* Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems. *Global Change Biology* 16, 1213-1228 (2010).
- 16 Falvey, M. & Garreaud, R.D. Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *Journal of Geophysical Research* 114, D04102 (2009).
- 17 Pelegrí, J.L., Marrero-Díaz, A. & Ratsimandresy, A.W. Nutrient irrigation of the North Atlantic. *Progress in Oceanography* 70, 366-406 (2006).
- 18 Pelegrí, J.L. & Csanady, G.T. Nutrient transport and mixing in the Gulf Stream. *Journal of Geophysical Research* 96, 2577-2583 (1991).
- 19 Sarmiento, J.L. *et al.* High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. *Nature* 427, 56-60 (2003).
- 20 Mahadevan, A. Impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton. *Annual Reviews of Marine Science* 8, 17.1-17.24 (2016).
- 21 Sigman, D.M., Hain, M.P. & Haug, G.H. The polar ocean and glacial cycles in atmospheric CO₂ concentration. *Nature* 466, 47-55 (2010).
- 22 Landschützer, P., Gruber, N., Bakker, D. & Schuster, U. Recent variability of the global ocean carbon sink. *Global Biogeochemical Cycles* 28, 927-949 (2014).
- 23 Sundquist, E.T. & K. Visser. The geological history of the carbon cycle, in *Treatise on Geochemistry*, vol. 6, edited by D. Holland and K.K. Turekian, pp. 425-472, Elsevier, London (2003).
- 24 Mcleod, E. *et al.* A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9, 552-560 (2011).
- 25 Liu, Z.-H. & Zhao, J. Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink. *Environmental Geology* 39, 1053-1058 (2000).
- 26 Jiao, N. *et al.* Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean. *Nature Reviews Microbiology* 8, 593-599 (2010).
- 27 Duarte, C.M. & Agusti, S. The CO₂ balance of unproductive aquatic ecosystems. *Science* 281, 234-236 (1988).
- 28 Mattes, T.E. *et al.* Sulfur oxidizers dominate carbon fixation at a biogeochemical hot spot in the dark ocean. *The ISME journal* 7, 2349-2360 (2013).
- 29 Hoegh-Guldberg, O. *et al.* Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737-1742 (2007).
- 30 Hoegh-Guldberg, O. & Bruno, J.F. The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science* 328, 1523-1528 (2010).
- 31 Hansell, D.A. Recalcitrant dissolved organic carbon fractions. *Annual Review of Marine Sciences* 5, 421-445 (2013).
- 32 Duarte, C.M. *et al.* Tipping elements in the Arctic marine ecosystem. *Ambio* 41, 44-55 (2012).
- 33 Canadell, J.G. *et al.* Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 18,866-18,870 (2007).
- 34 Wohlers, J. *et al.* Changes in biogenic carbon flow in response to sea surface warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 7067-7072 (2009).
- 35 Lovelock, J.E. Gaia as seen through the atmosphere. *Atmospheric Environment* 6, 579-580 (1972).
- 36 Lovelock, J.E. & Margulis, L. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis. *Tellus* 26, 2-10 (1974).
- 37 Margulis, L. & Lovelock, J.E. Biological modulation of the Earth's atmosphere. *Icarus* 21, 471-489 (1974).
- 38 Pelegrí, J.L. A physiological approach to oceanic processes and glacial-interglacial changes in atmospheric CO₂. *Scientia Marina* 72, 185-202 (2008).
- 39 Pelegrí, J.L. *et al.* Global constraints on net primary production and inorganic carbon supply during glacial and interglacial cycles. *Paleoceanography*, 28, 713-725 (2013).
- 40 Herrero, C., García-Olivares, A. & Pelegrí, J.L. Impact of anthropogenic CO₂ on the next glacial cycle. *Climatic Change* 122, 283-298 (2014).

REFERENCIAS COMENTADAS

Aiken, C.A., Navarrete, S.A. & Pelegrí J.L. Potential changes in larval dispersion and along-shore connectivity in the central Chilean coast due to an altered wind climate. *Journal of Geophysical Research – Biogeosciences* 116, G04026 (2011).

El cambio climático puede llevar a condiciones oceanográficas y meteorológicas sustancialmente distintas a las actuales. En este trabajo se investigan cuáles serán estos cambios a lo largo de la costa de Chile para el escenario de cambio A2. Se aprecia una intensificación de la surgencia costera que conlleven un enfriamiento medio de 1°C sobre gran parte de la zona, así como una intensificación de la corriente profunda hacia el polo y del campo de remolinos. El efecto de estos cambios sobre la conectividad de las especies entre distintas regiones costeras, ejemplificado mediante el estudio de larvas a la deriva, depende de su capacidad de movimiento vertical. Se concluye que es probable que los cambios ambientales conlleven una reorganización de las comunidades costeras.

Pelegrí, J.L. A physiological approach to oceanic processes and glacial-interglacial changes in atmospheric CO₂. *Scientia Marina* 72, 185-202 (2008).

Los patrones espaciales y temporales de organización de la Tierra guardan asombrosas similitudes con los de los seres vivos complejos, tales como los mamíferos. En este trabajo se explora la circulación oceánica desde esta perspectiva fisiológica, identificando las variables que representan la tasa cardíaca, el volumen de latido, las diferencias arterio-venosas y la actividad metabólica de nuestro océano. Se construye un modelo simple que reproduce cambios entre dos estados metabólicos distintos y se concluye que los ciclos glaciales-interglaciales de nuestro planeta son análogos a periodos de recuperación-ejercicio en seres vivos.

Sarmiento, J.L., Gruber, N., Brzezinski, M.A. & Dunne, J.P. High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. *Nature* 427, 56-60 (2003).

La **circulación meridional profunda** representa un sumidero de agua en altas latitudes, que incorpora materia orgánica producida en las capas superficiales desde la primavera hasta el otoño. Deben por tanto existir rutas de retorno de este volumen de agua a las regiones de formación de aguas profundas. Más aún, tras discurrir lejos de la superficie oceánica, la materia orgánica disuelta en estas aguas se convierte en nutrientes inorgánicos que después pueden sostener a la producción primaria. En este trabajo se investigan las rutas de retorno y se concluye que la principal fuente de nutrientes en las aguas termoclinas proviene del Océano Austral, en lo que se denominan las aguas modales subantárticas.

Sigman, D.M., Hain, M.P. & Haug, G.H. The polar ocean and glacial cycles in atmospheric CO₂ concentration. *Nature* 466, 47-55 (2010).

Se han realizado numerosos trabajos que intentan explicar las variaciones del CO₂ atmosférico entre periodos glaciales e interglaciales, valorando la importancia de diferentes mecanismos en las variaciones observadas. Un ejemplo de ello es este trabajo, en el que se propone que los océanos acumulan grandes cantidades de carbono durante periodos glaciales debido a un efecto de bloqueo (grandes masas de hielo superficial impiden la pérdida de carbono) que es acrecentado por el incremento en la alcalinidad oceánica.

Talley, L. Closure of the global overturning circulation through the Indian, Pacific, and Southern Oceans: schematics and transports. *Oceanography* 26, 80-97 (2013).

La **circulación meridional profunda**, o cinta transportadora global, requiere conexiones entre los diferentes océanos y entre las aguas profundas y superficiales. En este trabajo se investigan estas conexiones en el Océano Austral, que incluyen las aguas profundas de origen norte provenientes del Pacífico, Índico y Atlántico, así como las vías de retorno de las aguas que afloran en el Océano Austral cuando retornan a las regiones de formación de aguas profundas en el Atlántico Norte. Destaca el importante rol de los vientos superficiales creando surgencias en el Atlántico Sur y la gran relevancia de los procesos de mezcla verticales en el Índico y Pacífico.

GLOSARIO

Biósfera oceánica. La biósfera es el conjunto de todos los ecosistemas del planeta, que interacciona con la litosfera, hidrósfera, criosfera y atmósfera. La biosfera oceánica comprende el conjunto de ecosistemas oceánicos, conectados a través de las corrientes que operan a diferentes escalas espaciales y temporales.

Capa de mezcla. La turbulencia oceánica crea regiones de agua mezclada, con propiedades prácticamente homogéneas, es lo que se denominan las capas de mezcla. Una de estas regiones es la capa de mezcla superficial donde la turbulencia causada por los vientos revuelve las primeras decenas de metros de la columna de agua. En invierno, inducido por la pérdida de calor de las aguas más superficiales, la capa de mezcla se hace más profunda e incorpora nutrientes de la parte más somera de la termoclina.

Ciclo glacial-interglacial. Hace unos 3 millones de años, a finales del Plioceno, la Tierra acumuló cantidades sustanciales de hielo. Desde entonces, primero con una periodicidad de unos 40 ka y durante los últimos cuatro ciclos con una periodicidad de unos 100 ka, la Tierra ha oscilado entre periodos relativamente cálidos (interglaciales) como el presente y periodos sustancialmente más fríos (glaciales) como el ocurrido hace unos 20 ka, cuando la temperatura media del planeta disminuyó en unos 3-4°C, el nivel medio del mar bajó unos 125 m y la concentración de CO₂ atmosférico pasó de 280 a 180 ppm.

Circulación meridional profunda. También llamada cinta transportadora global o circulación termohalina global, es comparable al circuito sistémico de los seres vivos. Es un circuito que se inicia en las altas latitudes del Océano Atlántico Norte y en las plataformas continentales alrededor del continente Antártico, llena las capas profundas de los océanos (generalmente por debajo de 1-2 km), y progresivamente regresa a las capas superficiales por medio de procesos de mezcla vertical y de surgencia inducida por los vientos, para finalmente alcanzar aquellas regiones iniciales de formación.

Circulación termoclina. Las aguas que circulan en la termoclina permanente lo hacen manteniendo su temperatura aproximadamente constante, es decir, se desplazan a lo largo de superficies isotermales. Ello, junto con la variabilidad espacial de la profundidad de las isotermales (se

hunden en los giros subtropicales y suben en las regiones subpolares y tropicales) hace que la circulación no tenga lugar en un plano horizontal sino que, por el contrario, experimente desplazamientos verticales que pueden superar 1 km –es lo que se denomina la circulación termoclina–. Esta circulación no solo conecta las aguas superficiales con las sub-superficiales sino que también acopla a los giros oceánicos adyacentes de los otros grandes océanos.

Corriente geostrófica. Las corrientes experimentan muy diversas fuerzas horizontales: gradientes de presión, fuerzas de fricción (debido a vientos en la superficie del océano, fricción con el fondo y fricción dentro del propio fluido), la fuerza de Coriolis y las fuerzas generadoras de la marea. Sin embargo, cuando los términos de cambio local y flujos de momento son despreciables y las fuerzas dominantes son los gradientes de presión horizontal y la fuerza de Coriolis, obtenemos una descripción simplificada del flujo que denominamos corrientes geostróficas.

Elementos biolimitantes. Los elementos biolimitantes son aquellos necesarios para sostener a los procesos biológicos, con concentraciones que disminuyen hasta prácticamente cero en las aguas superficiales, cuando hay suficiente luz. Los macronutrientes constituyen la mayor parte de la composición de los organismos (fósforo, nitrógeno y silicio) mientras que los micronutrientes, aunque necesarios, se detectan en cantidades traza (zinc, hierro, selenio, manganeso y cobalto). El fitoplancton incorpora los macronutrientes limitantes en proporciones aproximadamente constantes, es lo que se denomina las proporciones esquiometéricas o de Redfield.

Efecto antropogénico. Por antropogénico, o antrópico, entendemos todo aquello que resulta de la actividad humana. En el contexto climático, nos referimos a efecto antrópico para indicar todas aquellas alteraciones causadas por la raza humana sobre la biodiversidad y el clima, incluyendo los ciclos de los elementos biolimitantes.

Efecto invernadero. La Tierra recibe radiación de onda corta proveniente del sol y emite radiación mucho más larga. La mayor parte de esta radiación, junto con flujos de calor sensible y latente proveniente de la superficie de la Tierra, es absorbida por la atmósfera que se calienta y la irradia de nuevo hacia la superficie de la Tierra. Este proceso conlleva que la temperatura superficial de la Tierra sea significativamente mayor que en la ausencia de atmósfera. Los dos gases de efecto invernadero más abundantes son el vapor de agua (36-70%) y el dióxido de carbono (9-26%), de allí la importancia de las alteraciones antrópicas del ciclo hidrológico y el CO₂ atmosférico.

ENSO (El Niño - Oscilación Sur). El fenómeno de El Niño estaba originalmente relacionado con la observación de aguas cálidas, durante la época de Navidad, en las costas de Perú y Chile. Estas aguas se relacionaban con una disminución de la surgencia costera y, por ende, de las pesquerías en la región. Posteriormente se apreció que El Niño es una de las fases de una teleconexión denominada la Oscilación del Sur, cuantificada por medio de la diferencia en presión a nivel del mar entre el Pacífico oriental y occidental. Durante una fase El Niño los vientos del este se debilitan y las aguas cálidas del Pacífico occidental se desplazan a lo largo del ecuador hacia las costas de América, llevando hacia el Este la región de convergencia horizontal en las capas

bajas de la atmósfera, con intensa convección vertical y fuertes lluvias. La fase opuesta de El Niño se denomina La Niña.

Equilibrio homeostático. Los homeostatos, como por ejemplo el termostato, son sistemas reguladores de una o más propiedades en organismos vivos, que actúan manteniendo las condiciones corporales estables a pesar de cambios en el ambiente externo. Un aspecto clave es que el organismo alcanza un equilibrio externo gracias a toda una serie de procesos internos que continuamente conducen hacia esa estabilidad, en este sentido hablamos de un equilibrio dinámico.

Fotosíntesis. La fotosíntesis es el proceso mediante el cual las plantas y otros organismos autotróficos convierten la luz solar en energía química, almacenada en moléculas de carbohidratos formadas por carbono y agua, al tiempo que se libera oxígeno. Se trata de un proceso de almacenamiento de energía con un alto grado de orden (baja entropía) que puede ser utilizada para sostener la actividad metabólica de los organismos vivos.

Fuerza de Coriolis. Cualquier objeto o fluido que se encuentre encima de un sistema en rotación, como la Tierra alrededor de su eje, experimenta la misma tasa de rotación de la Tierra. Asociado a esta rotación, el objeto o fluido experimenta una fuerza centrífuga que es máxima en el ecuador y se anula en los polos. Esta fuerza formalmente se puede expresar como una pequeña anomalía gravimétrica, función de la latitud. Sin embargo, si un fluido tiene una velocidad relativa con respecto a la Tierra entonces la fuerza centrífuga se modifica ligeramente. La componente sobre el plano horizontal, tangente a la superficie de la Tierra, de este exceso en fuerza centrífuga (diferencia entre la fuerza centrífuga modificada y sin modificar) es la fuerza de Coriolis, de gran importancia en la descripción del movimiento de los fluidos a escalas espaciales y temporales relativamente largas.

Giro subtropical. Los giros subtropicales ocupan las regiones centrales de todos los océanos, aproximadamente entre 15 y 45° de latitud, con un patrón de circulación anticiclónica (sentido opuesto al de rotación de la Tierra: horaria/antihoraria en el hemisferio norte/sur). Tienen corrientes intensas en el margen occidental –llamadas corrientes de frontera oeste como, por ejemplo, la Corriente del Golfo en el Atlántico Norte– y corrientes más difusas en su interior. La termoclina permanente alcanza más de 1 km en el Atlántico Norte, con isotermas más profundas en la parte interior del giro (localizado cerca del margen occidental). Esto hace que se inhiba el flujo de nutrientes hacia la capa fótica, convirtiendo a los giros subtropicales en los grandes desiertos oceánicos.

Mesoescala. La variabilidad oceánica está dominada por estructuras con un tamaño horizontal de unos 10 a 100 km y vertical de decenas a centenares de metros. Estas estructuras – que incluyen meandros, remolinos, anillos y filamentos – se generan como resultado de las inestabilidades de las corrientes, tanto las que circulan cerca del talud continental como las corrientes interiores tras su encuentro con obstáculos como islas y montañas submarinas. Las estructuras mesoescalares están aproximadamente en balance geostrófico, con su intensidad dependiendo de la energía de la corriente madre (que es función del viento actuando sobre toda su cuenca oceánica) y su tamaño disminuyendo con la latitud.

Metabolismo. El metabolismo de un organismo son las transformaciones energéticas que realiza, necesarias para sostener su vida; por tasa metabólica se entiende la velocidad a la que tienen lugar esas transformaciones. La tasa metabólica oceánica viene dada por la producción neta de la comunidad autotrófica, igual a la producción primaria menos la respiración de esa comunidad. Se sostiene mediante flujos de nutrientes profundos y de materia orgánica remineralizada.

Remineralización. En la zona fótica, por medio de la fotosíntesis, tiene lugar la transformación del carbono y nutrientes inorgánicos en materia orgánica. Tras escapar de la superficie del océano, la comunidad microbiana inicia un proceso de oxidación de esta materia orgánica que concluye con su remineralización en forma de nutrientes inorgánicos. Dependiendo del tiempo que tarde dicho proceso hablamos de materia orgánica lábil (horas a días) o materia orgánica recalcitrante (con tiempos de vida de hasta miles de años).

Salinidad. El concepto de salinidad ha evolucionado en las últimas décadas. Inicialmente se cuantificó como cantidad de soluto por volumen de solvente pero en 1978, para facilitar su medida, se introdujo el concepto de salinidad práctica (sin unidades) como una función de la temperatura, presión y conductividad. En 2010 este concepto fue reemplazado por el de salinidad absoluta, con unidades de gramos de sales por kilogramo de agua, que toma en cuenta la variabilidad regional en la composición de las sales oceánicas.

Sistema carbonato. El carbono inorgánico disuelto en agua mantiene la siguiente reacción de equilibrio: $\text{CO}_2 \text{ gas} \leftrightarrow \text{CO}_2 \text{ líquido} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \leftrightarrow 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$. La distribución de carbono inorgánico entre estas especies depende de su concentración y de la alcalinidad del agua, que depende a su vez de las fuentes y sumideros de carbonatos, CaCO_3 . La distribución de equilibrio resultante es lo que se denomina el sistema carbonato.

Submesoescala. Inmediatamente por debajo de la mesoescala nos encontramos con la submesoescala, donde el balance de fuerzas deja de ser geostrofico debido a la predominancia de los términos de cambio local y advección de momento. Las escalas horizontales características de la submesoescala son de centenares de metros a kilómetros, y las correspondientes escalas verticales son de metros a decenas de metros. La submesoescala está caracterizada por intensos movimientos verticales que con frecuencia representan una entrada de nutrientes o un sumidero de materia orgánica a la capa fótica.

Surgencia. Las surgencias son movimientos verticales hacia la superficie del océano que tienen lugar a distintas escalas espaciales y temporales, desde la submesoescala hasta los grandes giros subtropicales. Son necesarios para recircular las aguas dentro de la propia termoclina permanente y para cerrar la **circulación meridional profunda**. Están asociados a procesos de divergencia en la capa de mezcla superficial, inducidos por el viento o por la propia dinámica de las corrientes. Los valores típicos oceánicos son de metros por día y aumentan cuando su origen tiene que ver con procesos a menores escalas espaciales.

Teleconexiones. Se entiende por teleconexiones a la capacidad que tienen regiones planetarias muy distantes de mostrar una elevada correlación en algunas de las variables que caracterizan su dinámica. La teleconexión

surge rápidamente por medio de la atmósfera, con desfases temporales de pocos días, y mucho más lentamente en el océano, con desfases que pueden ir desde meses hasta muchos años. Un ejemplo clásico de teleconexión es ENSO pero hay otros ejemplos tales como la Oscilación del Atlántico Norte o los cambios en los sistemas de vientos y corrientes asociados al desplazamiento latitudinal del ecuador término del planeta, también llamada Zona de Convergencia Intertropical.

Termoclina. La termoclina es la porción de la columna de agua donde existen gradientes verticales significativos en temperatura. La termoclina estacional está situada inmediatamente por debajo de la capa de mezcla, con espesores que suelen ser de sólo unas decenas de metros; en esta termoclina los gradientes verticales son máximos a finales de verano, cuando la capa de mezcla se calienta por incorporación de energía solar. Justo por debajo de la termoclina estacional empieza la termoclina permanente, que ocupa unos 200 m de la columna de agua en zonas ecuatoriales y más de 1000 m en el giro subtropical del Océano Atlántico Norte. Los gradientes verticales de temperatura en la termoclina permanente reflejan los gradientes latitudinales de temperatura por debajo de la capa de mezcla, indicando que las aguas sub-superficiales tienen su origen en la superficie del océano a mayores latitudes (ver **circulación termoclina**).

Zona fótica. La zona fótica comprende las capas más superficiales de la columna de agua hasta una profundidad donde la tasa de incorporación de dióxido de carbono por fotosíntesis iguala a la tasa de producción de carbono por respiración. Formalmente, la profundidad depende de la turbidez del agua (a través del coeficiente de atenuación de la luz) aunque en la práctica la turbulencia hace que la zona fótica se extienda hasta el fondo de la capa de mezcla.

Chelenko/Lago General Carrera/Lago Buenos Aires. Lago de origen glaciar compartido por Chile y Argentina. Con un área total de 1.850 km² es el tercero más grande de Sudamérica. Foto Pablo A. Marquet







Los microorganismos como hongos, y cianobacterias y sus asociaciones en costras sobre el suelo o líquenes sobre rocas y plantas, desempeñan un papel fundamental en el ciclaje de nutrientes en los ecosistemas. Foto Pablo Maldonado

Biogeoquímica aplicada: estudios de caso sobre la interacción entre los elementos esenciales para la vida y el cambio global

Humberto Marotta, Alexandra Rodríguez, Jorge Durán, Alex Enrich-Prast y Luana Pinho

RESUMEN

El carbono (C) y el nitrógeno (N) son elementos imprescindibles para la construcción de la materia orgánica que forma las estructuras físicas y las reservas energéticas de los seres vivos. Mientras la producción primaria sintetiza moléculas orgánicas, la degradación biológica de estos mismos compuestos libera la energía que propicia la actividad vital, produciéndose así el ciclo de la materia orgánica. Predecir las consecuencias del cambio global sobre el ciclo de la materia orgánica es una tarea compleja, no solamente debido a los múltiples factores implicados sino también por la variedad de interacciones entre ellos, tanto a escala local como global. Este capítulo discute dos estudios de caso sobre la capacidad del cambio global para alterar el ciclo de elementos esenciales para la vida a través de las interacciones emergentes entre sus diversos factores. El primer estudio evalúa los efectos del calentamiento global sobre las reservas de C en el sedimento del fondo de lagos tropicales y boreales, obteniendo evidencias de un efecto de retroalimentación positiva. El segundo estudio proporciona sólidas evidencias de los efectos sinérgicos de dos de los principales factores de cambio global (el aumento de la deposición atmosférica de N y el cambio climático) en la capacidad de los microorganismos del suelo para mantener su actividad. Estos estudios evidencian que los efectos de retroalimentación y sinérgicos pueden representar importantes mecanismos antropogénicos de alteración del funcionamiento de los ecosistemas, y que ambos mecanismos deben ser mejor comprendidos y considerados en las futuras proyecciones de las consecuencias del cambio global, así como en cualquier planificación del uso de los recursos ambientales.

En los capítulos anteriores se abordaron aspectos generales sobre la biogeoquímica global y su papel en la regulación del clima y la biodiversidad del planeta, poniendo el foco en los factores controladores y en los mecanismos de funcionamiento de los cambios globales. Se discutió cómo el cambio global puede afectar tanto al **metabolismo** (ver glosario) del “ser humano biológico” (e.g. disponibilidad de agua potable, extensión de áreas emergidas determinadas por el nivel del mar y la salud pública) como a las demandas socioeconómicas del “ser humano social complejo” (e.g. disponibilidad de recursos para la generación de empleo y renta).

Entendimos así cómo los compuestos producidos por los seres vivos, denominados materia orgánica o biomasa, están formados por diversos elementos químicos, entre los cuales destacan por su abundancia y relevancia el carbono (C) y el nitrógeno (N). Estos elementos son imprescindibles en la construcción de la biomasa que sirve tanto para formar las estructuras físicas como las reservas energéticas de los seres vivos. Así como la producción primaria, propiciada por la energía solar (fotosíntesis) o por reacciones químicas (quimiosíntesis), sintetiza moléculas orgánicas, la degradación biológica (respiración) de estos mismos compuestos libera la energía que propicia la actividad vital. Este proceso cíclico entre la producción y la degradación de la materia orgánica es análogo, a la construcción y deconstrucción de un puzzle,

cuyas piezas pueden estar libres, en forma de elementos químicos inorgánicos, o enlazadas (fijadas) en forma de biomasa.

En ese contexto, todavía se necesita un mejor entendimiento de los mecanismos de control del cambio global sobre el ciclado de la materia orgánica del planeta, tema crucial a la hora de proponer políticas para reducir los potenciales efectos negativos del cambio global sobre la sociedad. Predecir las consecuencias del cambio global en los ecosistemas es una tarea compleja, no solamente debido a los múltiples factores implicados sino también por la variedad de interacciones entre ellos, tanto a escala local como global. Los factores de cambio global pueden incluso generar efectos sinérgicos, es decir, que se maximizan más allá de lo esperado a partir de las relaciones lineales o simples sumas o restas de efectos de causas analizadas de manera aislada. Este capítulo pretende discutir estudios de casos sobre la capacidad del cambio global para alterar el ciclado de elementos esenciales para la vida y las relaciones humanas (C y N) a través de las interacciones emergentes entre sus diversos factores.

ESTUDIO DE CASOS

1. Carbono

La retroalimentación que agrava el calentamiento global: Convirtiendo reservas de carbono en gases de efecto invernadero en lagos Amazónicos

La reducción de las reservas de C fijado en la materia orgánica global tiene serias implicaciones para el clima del planeta, ya que está relacionada directamente con la intensificación de la emisión neta de gases de efecto invernadero a la atmósfera¹. En este contexto, el papel de las actividades humanas que influyen en las reservas orgánicas a través del control del **metabolismo**, es decir, el balance metabólico entre la producción y

la degradación de biomasa, es una fuente intensa de debate. Factores de cambio global como el enriquecimiento por nutrientes² o las alteraciones climáticas³ pueden tener efectos variados sobre la actividad biológica, en función de las diferentes condiciones ambientales. Hay casos en los que esos procesos pueden favorecer, en el balance neto de los ecosistemas, a la producción primaria (autotrofia), que incrementa los sumideros de C. Sin embargo, en otros casos, puede favorecer la degradación de la materia orgánica mediante su consumo (heterotrofia) que, a su vez, aumenta las concentraciones de C en la atmósfera a través de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄)

El cambio global afecta al balance metabólico de los ecosistemas, pudiendo estimular más la fijación de C (autotrofia neta) o a la degradación de la biomasa (heterotrofia neta)

En la superficie terrestre, los lagos desempeñan un papel relevante en el ciclado global del C, ya que a pesar de ocupar un área relativamente pequeña, tienen una amplia distribución geográfica⁴. Además, están situados frecuentemente a baja altitud, constituyendo destinos preferentes para los aportes de C de origen terrestre o acuático^{5,6}. La mayor cuenca hidrográfica del planeta se sitúa en la Amazonía, donde se forman numerosos lagos en extensas llanuras de inundación⁷. La selva amazónica presenta tasas intensas tanto de fijación como de liberación de C por los procesos metabólicos de fotosíntesis y respiración, respectivamente, ya que ambos procesos se ven favorecidos por el clima ecuatorial de elevadas temperaturas y pluviosidad⁸. En la cuenca amazónica, una buena parte de la materia orgánica producida por la intensa actividad biológica acuática o de la selva ecuatorial, que no es degradada (mineralizada) completamente a gas, puede ser arrastrada por la red de drenaje y acumularse en el sedimento del fondo de los lagos⁹. La materia orgánica depositada

en estos sedimentos puede sufrir intensas tasas de mineralización orgánica¹⁰ en contraste con lo que ocurre con los sedimentos de lagos más fríos de altas latitudes. Comúnmente, tasas de respiración elevadas pueden restringir los niveles de oxígeno (O₂) a una delgada capa superficial de los sedimentos lacustres, haciendo que las vías anaeróbicas de degradación orgánica (es decir, aquellas que ocurren en ausencia de O₂), sean una fuente relevante de gases de C desde el fondo de los lagos a la atmósfera¹¹.

La mineralización anaeróbica es el proceso de transformación de la materia orgánica a elementos inorgánicos en un medio sin oxígeno

Uno de los factores de control más importantes detrás de la degradación de las reservas orgánicas de C y de cualquier actividad biológica es la temperatura. El calentamiento global estimula la degradación biológica de la materia orgánica acumulada en compartimentos de los ecosistemas, como el suelo orgánico de bosques fríos y tundras o los sedimentos del fondo de ecosistemas acuáticos (ej. lagos, bahías, humedales). De este modo, el calentamiento global puede intensificar la producción metabólica de gases, lo que a su vez tiene la capacidad de aumentar el calentamiento de la biosfera a través del efecto invernadero que estos gases causan, generando así una “retroalimentación positiva”. Cada vez más evidencias confirman que estos procesos maximizan sustancialmente los efectos del cambio global sobre el ciclo de C y sobre el clima del planeta^{12,13}. Sin embargo, los estudios sobre las retroalimentaciones positivas por la temperatura son todavía escasos, especialmente en lo que atañe a las enormes reservas orgánicas de los ecosistemas cálidos de bajas latitudes¹⁴. Esa carencia de trabajos se debe, en parte, a la creencia de que las elevadas temperaturas presentes durante todo el año ya estimulan a los organismos independientemente del calentamiento previsto en los trópicos para las próximas décadas.

Retroalimentaciones positivas ocurren cuando un determinado proceso (ej. el calentamiento de la biosfera) intensifica su propio efecto (ej. favorece a los organismos que liberan gases que causan más calentamiento)

En ese sentido, presentamos aquí un estudio fruto de la colaboración entre universidades brasileiras y suecas publicado en la revista Nature Climate Change, en el que se evaluaron los efectos del calentamiento sobre las reservas de C en el sedimento del fondo de lagos. El objetivo de este artículo fue comparar en un mismo experimento las respuestas de la producción anaeróbica de CO₂ y CH₄ en sedimentos lacustres tropicales y boreales a lo largo de un gradiente de temperatura. Se muestrearon nueve lagos en la selva tropical amazónica, al oeste de la ciudad de Santarém (estado de Pará, Brasil) y ocho en un bosque boreal de coníferas al norte de la ciudad de Uppsala (Suecia), abarcando una amplia variedad de sedimentos lacustres en ambas zonas climáticas.

Los sedimentos superficiales de cada lago tropical y boreal se homogeneizaron e incubaron simultáneamente. Las muestras se sellaron dentro de frascos de incubación que contenían nitrógeno molecular (N₂) a presión ambiental, se mantuvieron aproximadamente a 4, 10, 14, 19, 29 y 40 °C y se analizaron en diferentes momentos a lo largo de 44 días. La cuantificación de las concentraciones de CO₂ y CH₄ en el interior de los frascos permitió determinar las tasas de producción anaeróbica de esos gases para cada sedimento lacustre y para cada temperatura. Los detalles de la metodología se encuentran en el artículo y en su material suplementario.

Por primera vez, los sedimentos de lagos de bosques tropicales amazónicos y boreales de coníferas se sometieron simultáneamente a un calentamiento experimental

El experimento reveló aumentos significativos de las tasas medias de producción anaeróbica de ambos gases de C

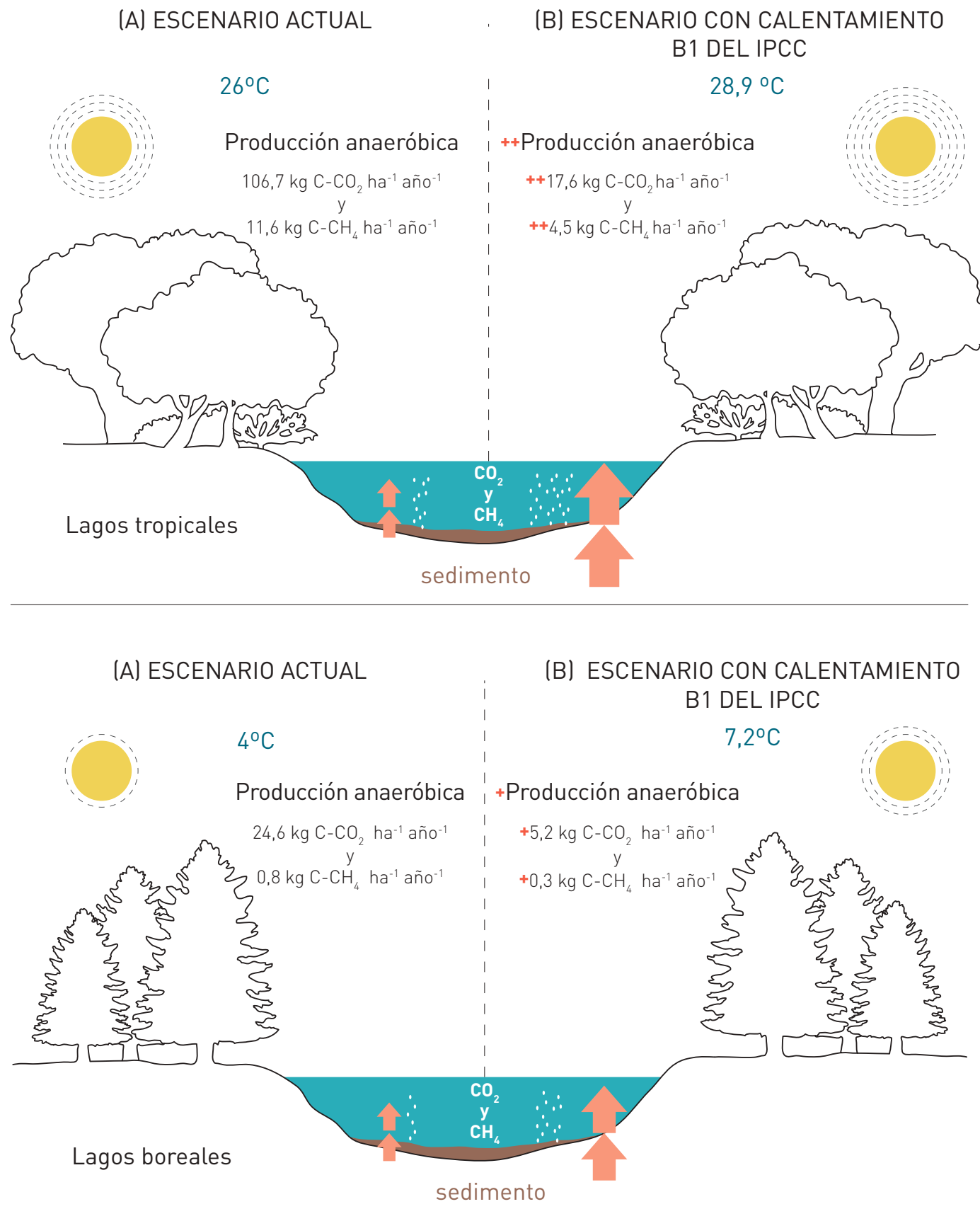


Figura 1: Diagrama comparativo de la respuesta de la producción anaeróbica de CO₂ y CH₄ en los sedimentos de lagos de la selva tropical amazónica (arriba) y de los bosques boreales de coníferas (abajo). Las estimaciones de las tasas de producción de ambos gases con la temperatura media actual están descritas en el ítem (A), mientras que los promedios de aumento proyectados en dichas tasas, en el escenario de calentamiento B1 del IPCC se muestra en el ítem (B) de cada panel

a temperaturas más elevadas, similares tanto en lagos boreales como tropicales. La determinación de esas tasas permitió estimar incrementos de la producción de CO₂ y CH₄ en los sedimentos lacustres anóxicos de acuerdo con proyecciones futuras de cambio climático. Para ello, se asumió un escenario de calentamiento relativamente conservador (B1) del Panel Intergubernamental del Cambio Climático para el año 2100, de 1,6 a 4,2 °C para el sur de Suecia y de 1,8 a 4,5 °C para la Amazonía¹⁵, el cual podría afectar a los sedimentos superficiales de los lagos por la frecuente mezcla de la columna de agua en esos ecosistemas. El incremento estimado de las tasas de mineralización anaeróbica con el aumento de la temperatura proyectado para 2100 fue de alrededor del 20% para el CO₂ y del 40% para el CH₄ en los sedimentos lacustres tanto boreales como tropicales (Figura 1).

A pesar de la similar sensibilidad relativa de la mineralización al calentamiento, la gran diferencia en las temperaturas anuales entre altas y bajas latitudes (4 y 26 °C respectivamente), resultó en estimas de tasas medias de producción anaeróbica en torno a 2,4 veces mayores en el caso del CO₂ y casi 5 veces mayores en el caso del CH₄ en sedimentos lacustres tropicales que en los boreales, (Figura 1). La elevada diferencia latitudinal en esas tasas medias también contribuyó a la previsión de mayores aumentos absolutos de la producción anaeróbica frente al calentamiento en los sedimentos lacustres tropicales que en los boreales, en torno a 2,4 veces para el CO₂ y 2,8 veces para el CH₄ (Figura 1).

Importantes reservas de C procedentes de bosques tropicales como los de la Amazonía y acumulados en los sedimentos acuáticos también pueden ser sensibles al calentamiento

Por tanto, el potencial aumento de la mineralización orgánica en las vastas áreas tropicales inundadas, debido al calentamiento global, podría constituir una importante retroalimentación positiva que debe ser mejor considerada en los escenarios de cambio global. Los resultados de este

estudio muestran que las reservas de C, no solamente de las latitudes frías, como previamente descrito, sino también de aquellas sometidas a altas temperaturas anuales, pueden ser significativamente reducidas en un mundo más cálido. Incluso aun cuando no todo el gas producido por la degradación orgánica alcanzase la atmósfera, la producción anaeróbica de CO₂ y CH₄ podría convertir grandes reservas de biomasa de la selva amazónica acumuladas en los sedimentos lacustres en una fuente de C especialmente sensible a una potencial retroalimentación de intensificación de cambio climático tanto en las altas como en las bajas latitudes.

2. Nitrógeno

La deposición de N como modulador del efecto del cambio climático: un ejemplo de cuando el efecto conjunto de dos factores de cambio global no es igual a la suma de sus efectos por separado

Como ya comentamos en el capítulo 6, el nitrógeno (N) es uno de los elementos imprescindibles para la vida en nuestro planeta, y el funcionamiento de los ecosistemas depende en gran medida de su disponibilidad. Aunque en muchos ecosistemas el N sigue siendo uno de los nutrientes que más limita el **metabolismo** de plantas y microorganismos¹⁶, las actividades humanas desarrolladas en el último siglo, como el uso de combustibles fósiles y la agricultura intensiva, han provocado un aumento de la concentración de N reactivo (Nr) en la atmósfera¹⁷. Este exceso de Nr tiene importantes efectos directos en el clima del planeta y, además, gran parte del mismo termina entrando en los ecosistemas terrestres y acuáticos a través de lo que llamamos deposición de N. Hoy en día, el aumento en la “deposición de N” de origen antropogénico es ya uno de los factores más importantes del cambio global, con graves consecuencias en los ecosistemas. Algunos de los efectos negativos frecuentes de la deposición de N son la **eutrofización** de los ecosistemas, alteraciones en la actividad y diversidad de especies, aumentos en la emisión de gases de efecto invernadero y cambios en la capacidad del ecosistema para fijar y/o almacenar C.

Llamamos deposición de N a la entrada de este nutriente desde la atmósfera a los ecosistemas, bien en forma de polvo (deposición seca) o disuelto en agua de lluvia y nieve (deposición húmeda). El aumento de la deposición de N de origen antropogénico es ya uno de los factores más importantes del cambio global

Por otro lado, uno de los aspectos más significativos del cambio global es la probable intensificación del ciclo hidrológico en muchas zonas del planeta, con la aparición de eventos extremos más frecuentes e intensos. Los modelos climáticos predicen un claro aumento en la aridez de muchas zonas de la tierra, pero también una mayor frecuencia e intensidad de tormentas¹⁸, lo que provocaría un incremento de los ciclos de secado y rehumedecido del suelo. Estos cambios tienen gran relevancia para el funcionamiento de los ecosistemas, ya que la humedad del suelo es clave para la actividad de los microorganismos y, por tanto, para los procesos bioquímicos en los que éstos participan (e.g. la descomposición de la materia orgánica, la mineralización del N, la fijación de N atmosférico, etc.).

Los modelos climáticos predicen un claro aumento en la aridez de muchas zonas de la tierra, pero también una mayor frecuencia e intensidad de tormentas, lo que provocaría un incremento de los ciclos de secado y rehumedecido del suelo

En la actualidad, los ecosistemas se enfrentan simultáneamente a múltiples factores de cambio global. Estos factores pueden generar efectos sinérgicos o no aditivos, es decir, efectos en los que el resultado de dos o más factores actuando conjuntamente no es la simple suma de los efectos de esos factores por separado¹⁹. En estos casos, los estudios científicos de un solo factor pueden no ser del todo eficaces para predecir los efectos de los diferentes factores de cambio global.

En este sentido, mostramos aquí un estudio publicado en la revista *Global Change Biology*²⁰, llevado a cabo por

investigadores de España, Portugal y Estados Unidos, que proporciona sólidas evidencias de la interacción entre dos de los principales factores de cambio global: el aumento de la deposición atmosférica de N y el cambio climático en bosques templados caducifolios del hemisferio norte. Se sabe que los microorganismos del suelo deben invertir una gran cantidad de energía y recursos para hacer frente al estrés causado por los cambios rápidos de humedad del suelo^{21,22}. Por esta razón, los autores pensaron que la capacidad de los microorganismos del suelo para mantener su actividad, a pesar de los cambios esperados en los patrones de lluvia, podría depender en mayor o menor medida de la disponibilidad de nutrientes del sistema y, por tanto, de la cantidad de N que llegase por contaminación atmosférica.

Los ecosistemas se enfrentan simultáneamente a múltiples factores de cambio global que podrían generar efectos sinérgicos o no aditivos, es decir, efectos en los que el resultado de dos o más factores actuando conjuntamente no es la simple suma de los efectos de esos factores por separado

Para demostrar esta hipótesis, los autores recolectaron muestras de suelos en seis parcelas de bosque caducifolio mixto que, además de recibir la deposición de N ambiental de la zona (~9 kg N ha⁻¹ año⁻¹), habían sido tratadas con adición de N durante 15 años simulando una contaminación crónica por deposición atmosférica (~50 kg N ha⁻¹ año⁻¹). Como control, también recolectaron muestras en seis parcelas que tan sólo habían recibido la deposición de N ambiental de la zona. Cada una de las muestras de suelo se dividió en cuatro réplicas, las cuales se incubaron durante un mes en oscuridad y temperatura constantes (30 °C) tapadas con un film que permitía el intercambio gaseoso con la atmósfera, pero las protegía de la desecación. Una de las réplicas se mantuvo a una humedad constante del 21% mientras que las otras tres réplicas se sometieron a un (al final de la incubación), dos (en el medio y final de la incubación) y cuatro (uno cada semana de incubación) eventos de secado y rehumedecido. Los eventos de secado y rehumedecido consistieron en un periodo de secado de dos días mediante el destapado de las muestras hasta bajar

CAMBIO CLIMÁTICO

INCREMENTO DE LA FRECUENCIA DE CICLOS DE SECADO-REHUMEDECIDO

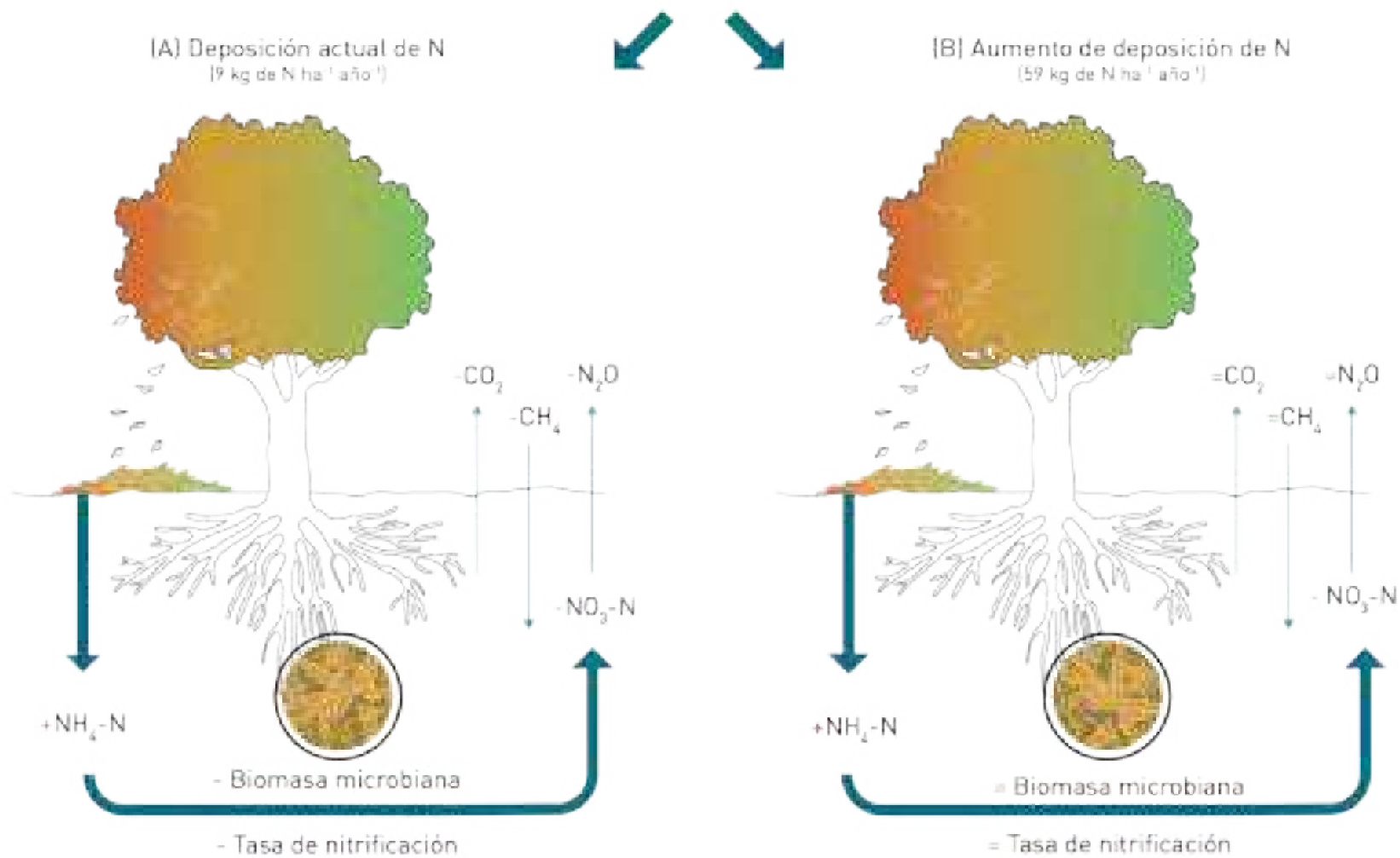


Figura 2. Diagrama comparativo de la respuesta de diferentes variables en las parcelas control (A) y las parcelas tratadas con N (B) al aumento en la frecuencia de ciclos de secado-rehumedecido

su humedad a un 5% y el rehumedecido de las mismas mediante la adición de agua destilada hasta subir su humedad de nuevo a un 21%. El equipo analizó antes, durante y después de la incubación el estado nutricional y funcional del suelo. Para ello, estimaron la cantidad y diversidad de microorganismos, las tasas de mineralización (oxidación del N orgánico a amonio); y nitrificación (oxidación del amonio a nitrato); la respiración microbiana (liberación de CO_2 a la atmósfera como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica llevada a cabo por microorganismos); las concentraciones de N inorgánico en el suelo (amonio + nitrato) y los flujos de gases de efecto invernadero (CO_2 , N_2O , CH_4) entre la atmósfera y el suelo.

Los resultados de este experimento demostraron que futuros cambios en los patrones de precipitación debidos al cambio climático podrían afectar significativamente la capacidad de

los suelos de estos bosques caducifolios de ciclar C y N. Así, un aumento de ciclos de secado y rehumedecido en bosques templados podría aumentar la concentración de amonio (NH_4-N) del suelo, principal fuente de N disponible para plantas en la mayoría de los ecosistemas. Este aumento en las concentraciones de NH_4-N podría deberse a varios mecanismos, como por ejemplo la liberación y mineralización de materia orgánica que se encontraba físicamente protegida dentro de **agregados del suelo** que se rompieron por efecto de los ciclos de secado y rehumedecido, o la muerte de microorganismos por **choque osmótico** y posterior mineralización de la materia orgánica que los constituía. Este último mecanismo explicaría, además, la disminución en la cantidad de microorganismos del suelo por efecto del aumento en los ciclos de secado y rehumedecido que se observó en este estudio. Sin embargo, un aumento de los ciclos de secado y rehumedecido podría

afectar negativamente a los microorganismos nitrificantes y a las tasas de nitrificación, ambos muy sensibles a cambios de humedad en el suelo, lo que produciría una disminución en la concentración de nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$; fuente de N preferida por las plantas y microorganismos; Figura 2A). Por último, mediante un efecto de retroalimentación negativa, un aumento en los ciclos de secado y rehumedecido podría provocar una disminución del intercambio de gases de efecto invernadero entre el suelo y la atmósfera, principalmente debido a la muerte de microorganismos del suelo y, en especial, de los microorganismos nitrificantes. Esta disminución provocaría una reducción de las tasas de respiración y nitrificación microbiana, y de la concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ en el suelo (precursor de la desnitrificación), lo cual conduciría a una reducción en las emisiones de CO_2 y N_2O respectivamente (Figura 2A).

Todos estos cambios tienen fuertes implicaciones en el funcionamiento y productividad del ecosistema, así como en el clima, pero el resultado más interesante del estudio es el papel clave de la deposición de N como modulador de las respuestas de estos bosques al cambio climático. Los autores observaron que mientras que en los suelos no tratados con N el aumento del número de ciclos de secado-rehumedecido afectó significativamente muchas de las variables estudiadas (ver párrafo anterior y Figura 2A), en los suelos tratados con N sólo las concentraciones de amonio y nitrato se vieron significativamente afectadas (Figura 2B).

La deposición de N atmosférico podría reducir los impactos de un futuro aumento en la frecuencia de ciclos de secado y rehumedecido sobre importantes procesos relacionados con el ciclado del C y el N en el suelo y la emisión de gases de efecto invernadero

Estos resultados constituyen un claro ejemplo de cómo un factor de cambio global (el aumento en la contaminación por N atmosférico) puede interactuar con otro factor (cambios en la precipitación debidos al cambio climático), modulando importantes características y funciones de los ecosistemas. Trabajos de investigación como éste ponen de manifiesto la

necesidad de estudios científicos enfocados en entender las posibles interacciones entre diferentes factores de cambio global, tanto para conocer mejor la respuesta de los ecosistemas al cambio global como para llevar a cabo predicciones más realistas y acciones de mitigación más eficientes.

3. Conclusiones

Estos casos de estudio evidencian que los efectos sinérgicos y de retroalimentación, aun cuando son poco conocidos, pueden representar importantes mecanismos antropogénicos de alteración del funcionamiento de los ecosistemas. Las proyecciones más realistas de las consecuencias de los cambios globales, indispensables en cualquier escenario actual de planificación sobre el uso de los recursos ambientales, pasan inexorablemente por considerar estas propiedades emergentes para realizar sus estimaciones. En este sentido, las sinergias y las retroalimentaciones constituyen temas que deben ser mejor comprendidos, y representan una frontera fundamental de investigación para la ciencia del cambio global.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 Lawrence, D. & K. Vandecar. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. *Nature Climate Change* 5, 27-36 (2015).
- 2 Marotta, H. *et al.* Long-term variability of CO_2 in two shallow tropical lakes experiencing episodic eutrophication and acidification events. *Ecosystems* 13, 382-392 (2010).
- 3 Yvon-Durocher, G. *et al.* Warming alters the metabolic balance of ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365, 2117-2126 (2010).
- 4 Downing, J.A. *et al.* The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography* 51, 2388-2397 (2006).
- 5 Cole, J.J., Caraco, N.F., Kling, G.W. & Kratz, T.K. Carbon-dioxide supersaturation in the surface waters of lakes. *Science* 265, 1568-1570 (1994).
- 6 Raymond, P.A. *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503, 355-359 (2013).
- 7 Hess, L.L. *et al.* Wetlands of the lowland Amazon basin: Extent, vegetative cover, and dual-season inundated area as mapped with jers-1 synthetic aperture radar. *Wetlands* 35, 745-756 (2015).
- 8 Ometto, J. *et al.* Amazonia and the modern carbon cycle: Lessons learned. *Oecologia* 143, 483-500 (2005).
- 9 Sobrinho, R. *et al.* Spatial and seasonal contrasts of sedimentary organic matter in floodplain lakes of the central Amazon basin. *Biogeosciences* 13, 467-482 (2016).

- 10 Cardoso, S.J. *et al.* Do models of organic carbon mineralization extrapolate to warmer tropical sediments? *Limnology and Oceanography* 59, 48-54 (2014).
- 11 Bastviken, D. *et al.* Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science* 331, 50 (2011).
- 12 Gudas, C. *et al.* Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature* 466, 478-481 (2010).
- 13 Wadham, J.L. *et al.* Potential methane reservoirs beneath antarctica. *Nature* 488, 633-637 (2012).
- 14 Dillon, M.E., Wang, G. & Huey, R.B. Global metabolic impacts of recent climate warming. *Nature* 467, 704-788 (2010).
- 15 IPCC, 2007. *Climate change 2007: The Physical Science Basis*. Paris: pp: 18.
- 16 Vitousek, P.M. & Howarth, R.W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry* 13, 87-115 (1991).
- 17 Galloway, J.N. *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science* 320, 889-892 (2008).
- 18 IPCC. *Climate change (2013) The Physical Science Basis*. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge (2013).
- 19 Matesanz, S., Escudero, A. & Valladares, F. Impact of three global change drivers on a mediterranean shrub. *Ecology* 90, 2609-2621 (2009).
- 20 Morillas, L. *et al.* Nitrogen supply modulates the effect of changes in drying-rewetting frequency on soil C and N cycling and greenhouse gas exchange. *Global Change Biology* 21, 3854-3863 (2015).
- 21 Manzoni, S., Schimel, J.P. & Porporato, A. Responses of soil microbial communities to water stress: Results from a meta-analysis. *Ecology* 93, 930-938 (2012).
- 22 Manzoni, S. *et al.* A theoretical analysis of microbial eco-physiological and diffusion limitations to carbon cycling in drying soils. *Soil Biology and Biochemistry* 73, 69-83 (2014).

REFERENCIAS COMENTADAS

Raymond, P. *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503, 355-359 (2013).

En este artículo, Peter Raymond y sus colaboradores aportan evidencias consistentes sobre la importancia de estimar correctamente los intercambios de dióxido de carbono (CO₂) entre las aguas continentales y la atmósfera como una parte crucial en el cálculo global del balance de carbono de nuestro planeta. Los autores recalcularon el área media de la superficie de ríos, lagos y embalses, estimando valores de flujos de CO₂ mayores que los encontrados en estudios anteriores para ríos y menores para los demás sitios. Los autores discuten acerca de la incerteza de las estimaciones realizadas y destacan la importancia de llevar a cabo mediciones directas para evitar estimaciones erróneas en sitios con pocos muestreos. Finalmente, destacan la importancia de los ríos en la emisión de CO₂ a la atmósfera, a pesar de presentar una cobertura superficial pequeña, y de las grandes emisiones desde lagos y embalses (cerca de la mitad de las emisiones globales de CO₂), principalmente en zonas húmedas tropicales. Por todo ello, concluyen que es necesario destacar la contribución de las aguas continentales en la emisión de CO₂ a la atmósfera desde fuentes terrestres.

Bastviken, D. *et al.* Freshwater methane emission offset the continental carbon sink. *Science* 331, 50 (2011).

Bastviken *et al.* discuten que lagos, ríos y embalses forman parte del paisaje terrestre y reciben grandes aportes laterales desde la cuenca de drenaje, sin embargo no son debidamente incluidos en el ciclo terrestre del carbono (C). A partir de la compilación de datos en un amplio rango de latitudes, los autores ponen de manifiesto el relevante papel de las aguas continentales como fuentes de metano (CH₄) a la atmósfera. Debido a que el efecto invernadero del CH₄ es mayor que el del CO₂, la contribución de los ambientes acuáticos a la emisión de este gas resultaría de suma importancia, siendo una pieza clave en el balance global del C.

Galloway, J.N. *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science* 320, 889-892 (2008).

En este artículo, Galloway y colaboradores discuten sobre cómo el ser humano ha cambiado y sigue cambiando el ciclo del nitrógeno (N) debido a una creciente demanda de este elemento tanto en la agricultura como en la industria, al uso de combustibles fósiles y a la ineficiencia en el uso de N reactivo (Nr). Los autores intentan responder a preguntas tan complejas como cuál es el destino último del Nr, cómo afecta el Nr a la salud humana, o cómo responderán las regiones tropicales al incremento en las entradas de N. Finalmente, terminan el artículo resaltando aquellas partes del ciclo global del N donde se concentran los mayores flujos de N y donde debería ser más fácil una intervención para reducir la cantidad de Nr creado o perdido al medioambiente, no sin antes reconocer que no todas las intervenciones han de ser para reducir el Nr, ya que en algunas regiones del planeta es necesario un aumento sustancial del mismo para poder sostener a la población.

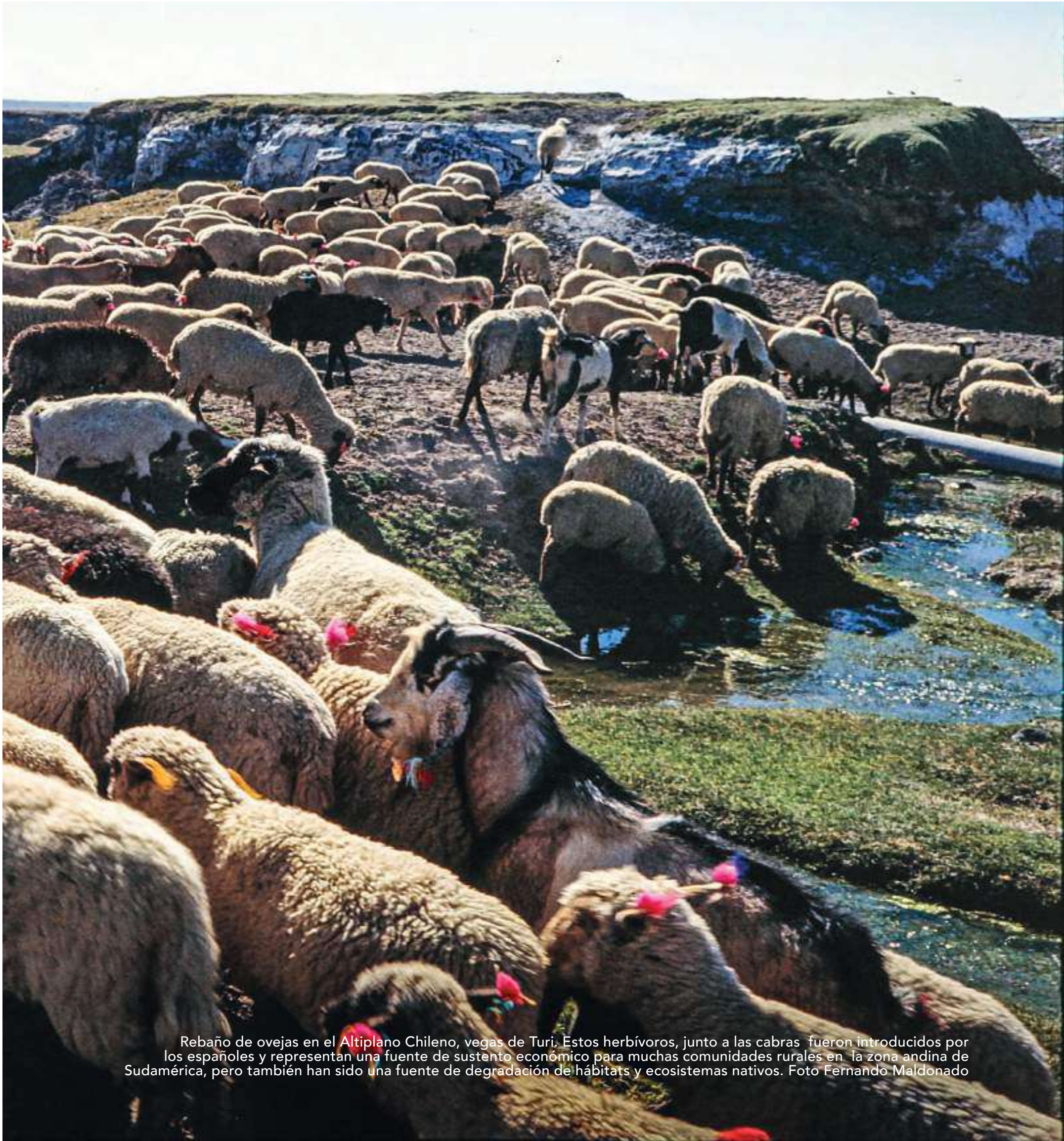
GLOSARIO

Agregados del suelo: Los agregados del suelo son grupos de partículas de suelo (limos, arcillas o arenas) que se unen entre sí de manera más o menos intensa por la acción de arcillas húmedas, materia orgánica o microorganismos.

Choque osmótico: Es una disfunción fisiológica causada por un cambio brusco en la concentración de sales alrededor de una célula, que causa un movimiento rápido de agua a través de la membrana celular. Este movimiento puede ser de fuera a dentro de la célula, si la concentración de sales es mayor en el interior de la célula, o de dentro a fuera si la concentración es mayor en el exterior.

Metabolismo: Conjunto de reacciones biológicas que sintetizan y degradan (rompen) la materia orgánica.





Rebaño de ovejas en el Altiplano Chileno, vegas de Turi. Estos herbívoros, junto a las cabras fueron introducidos por los españoles y representan una fuente de sustento económico para muchas comunidades rurales en la zona andina de Sudamérica, pero también han sido una fuente de degradación de hábitats y ecosistemas nativos. Foto Fernando Maldonado



Radiación ultravioleta; espada de doble filo

Aurora Gaxiola, Francisco I. Pugnaire, Vinicius F. Farjalla y Miriam Fernández

RESUMEN

La radiación ultravioleta (UV), a pesar de ser un componente muy pequeño de la energía solar que llega a la superficie terrestre (menos del 7%), ha sido muy importante para el desarrollo y evolución de la vida. Y a pesar de que pequeñas dosis de radiación UV son muy importantes para el metabolismo de muchos seres vivos, altas dosis de UV pueden tener efectos muy negativos sobre la vida, principalmente al alterar la química de la molécula de ADN (ácido desoxirribonucleico). En los últimos 50 años las actividades industriales han alterado la química de la atmósfera y una consecuencia de esto es el incremento de la radiación UV que llega a la superficie terrestre. El incremento de la radiación UV ha modificado la genética de algunos seres vivos, la forma y estructura de algunas plantas, el comportamiento de algunas especies animales, y estos efectos han escalado al funcionamiento de los ecosistemas. En este capítulo hacemos una pequeña reseña de los efectos que el incremento de radiación UV ha tenido sobre ecosistemas terrestres, dulceacuícolas y marinos, mostrando investigaciones que se han hecho dentro del Laboratorio. Si bien los efectos sobre la biodiversidad y funcionamiento de los ecosistemas han sido altos, nosotros como especie humana hemos tenido que modificar hábitos de comportamiento y varios países han generado políticas públicas para prevenir el impacto de la radiación UV sobre la salud humana. Este capítulo quiere también mostrar la importancia del vínculo entre la comunidad científica y los tomadores de decisiones, poniendo como ejemplo el Protocolo de Montréal, firmado en los años 70 del pasado siglo, que prohibió el uso de algunos productos que alteran el ozono de la atmósfera, y como consecuencia disminuyó la cantidad de radiación UV que llega a la superficie terrestre.

Hojarasca en bosque de la cordillera de la costa, Zapallar, en Chile central. Los hongos y bacterias del suelo juegan un rol esencial en la descomposición de la materia orgánica, como hojas y otros restos de plantas y animales, permitiendo su movimiento en los ecosistemas.
Foto Pablo A. Marquet

1. La radiación solar y la atmósfera

La radiación solar es esencial para la vida en la Tierra y la radiación ultravioleta (UV), a pesar de ser un componente muy pequeño de la energía solar que llega a la superficie terrestre (menos del 7%), ha tenido un efecto muy importante en el desarrollo y evolución de la vida¹. La radiación UV se divide en tres tipos de acuerdo a la longitud de onda que las caracteriza: UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) y UV-C (100-280 nm). La mayor parte de la radiación UV es filtrada por la capa de **ozono** presente en la atmósfera terrestre, en la estratosfera. El **ozono** desempeña un papel fundamental al absorber los rayos UV provenientes del sol, que en altas dosis resultan dañinos para los seres vivos². De hecho, la radiación UV-C es totalmente filtrada y solamente una pequeña parte de las radiaciones UV-A y UV-B llega a la superficie terrestre. Por lo tanto, sin la presencia de esta “capa protectora” la vida en la Tierra no existiría como la conocemos. A lo largo de la historia de la Tierra, la composición espectral de la radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra ha cambiado³. Lo anterior se explica, en parte, porque la capa de **ozono** estratosférico no siempre ha estado presente¹. De hecho, como el **ozono** es **alótropo** del oxígeno su acumulación en la atmósfera también es producto miles de millones de años de actividad biológica. En ese contexto geológico, podemos decir que la vida en la Tierra ha evolucionado expuesta a diferentes niveles de radiación UV³ y muchos seres vivos presentan rasgos o estructuras biológicas que se han correlacionado con defensa o protección ante los efectos negativos de ésta¹.



Figura 1. De izquierda a derecha se muestra un solmáforo en la ciudad de Antofagasta (Chile), y la campaña para alertar a los ciudadanos de Australia del Oeste sobre la importancia de utilizar protector solar. El anuncio dice: "Limitar (o cortar) la exposición solar de tu piel es mas fácil que extirpar (cortar) el cáncer de piel". El anuncio incluye un dosificador de protector solar.

El principal efecto negativo de la radiación UV sobre la vida se relaciona con alteraciones que se generan en la estructura de la molécula de ADN (ácido desoxirribonucléico) debido a la energía fotoquímica de la radiación UV (principalmente la UV-B)². Las lesiones al ADN resultan en la pérdida de la actividad biológica del ADN y su capacidad para almacenar información⁴. Por otro lado pequeñas dosis de radiación UV son muy importantes para el funcionamiento de algunos seres vivos, por ejemplo, para nosotros los humanos, ya que puede afectar el metabolismo de la vitamina D, el funcionamiento del sistema inmune e inclusive nuestro estado de ánimo⁵. Y en otros seres vivos, se ha relacionado la capacidad visual de insectos y pájaros^{6, 7}, la producción de pigmentos en flores⁸, y las características químicas de algunas plantas⁹. Por lo anterior es muy relevante entender las consecuencias sobre los seres vivos que pueden generar los cambios en la cantidad de radiación UV que llega a la superficie terrestre¹⁰.

1.1 La capa de ozono y consecuencias de su degradación

Las actividades industriales han generado cambios en la química de la atmósfera que han afectado la capa de **ozono**. En la década de los setenta, investigadores

especialistas en química y ciencias de la atmósfera observaron, a través de imágenes satelitales, un adelgazamiento en la capa de **ozono** y este adelgazamiento estaba principalmente en la Antártida, y es a lo que comúnmente se le conoce como "agujero de **ozono**"¹¹. El adelgazamiento de la capa de **ozono** incrementa la cantidad de radiación UV que alcanza la superficie de la Tierra, especialmente la UV-B¹⁰, y en promedio, de 1980 a la fecha, la insidencia de radiación UV-B en ambos hemisferios ha incrementado en un 6%¹². Por ejemplo, para el año 2015 con solo un 1% de disminución en el grosor de la capa **ozono** atmosférico la radiación radiación UV-B sobre la superficie terrestre aumentó un 7% en verano y hasta un 35% en invierno¹², en un 20% en la Patagonia y algunas partes del sur de Sudamérica y 10% en Buenos Aires, Argentina¹². Este patrón de aumento en la radiación UV-B, que se ha observado en ambos hemisferios adquiere mayor relevancia en el hemisferio sur porque el adelgazamiento de la capa de **ozono** es mayor en el polo sur.

El aumento de radiación UV-B, como resultado de la eliminación parcial de la capa de **ozono**, tiene consecuencias directas sobre la salud humana y las políticas públicas de varios países, por ejemplo, en Australia el incremento de casos de cáncer de piel ha alcanzado tasas similares a los de una epidemia¹³, y en Nueva Zelanda se reportan en promedio 64.000 casos

nuevos de cáncer de piel al año¹⁴. En Chile, por otro lado, se han instalado en varias ciudades del norte de Chile los “solmáforos” (Figura 1), los cuáles informan acerca del índice de UV y alteran a la ciudadanía para que se protejan en función de los niveles de exposición de UV.

El aumento de la exposición a la radiación UV también representa una amenaza para los sistemas biológicos en diferentes niveles de organización. El incremento de radiación UV que alcanza la superficie terrestre tiene efectos diversos sobre los ecosistemas y los organismos que los habitan, comprometiendo su existencia tal y como la conocemos hoy en día. A continuación presentaremos cómo el aumento de la radiación UV-B, en combinación con otros factores de cambio global, pueden afectar los ecosistemas en términos de alterar procesos, funciones, atributos; cambios en la abundancia y composición de las especies, así como en los ciclos de nutrientes. En esta sección haremos una breve reseña de los efectos que los cambios en la incidencia de radiación UV pueden tener en diversos ecosistemas y presentaremos algunos trabajos realizados por miembros de este Laboratorio Internacional.

1.2 UV en ecosistemas terrestres

En los ecosistemas terrestres las principales consecuencias del incremento de la radiación UV que alcanza la superficie terrestre se relacionan con los efectos que ésta tiene sobre las plantas, los microorganismos del suelo y los ciclos de carbono y nitrógeno¹⁵. En relación a las plantas, una respuesta muy común al incremento de la radiación UV, es la producción de sustancias protectoras: moléculas tales como **ácidos fenólicos** y **flavonoides** que absorben la radiación UV-B y previenen el daño celular^{16,17} es decir actúan como “protector solar” de las plantas. Mayores concentraciones de otros compuestos como la lignina también se han observado en algunas plantas expuestas (experimentalmente) a dosis diferentes de radiación UV¹⁷. Lo que se ha reportado es que la lignina en la superficie de las hojas funciona como barrera, limitando la absorción de radiación UV, es decir, evita que la radiación penetre el tejido foliar y dañe las células vegetales¹⁸. Otro efecto del incremento de exposición

de UV en plantas son las alteraciones morfológicas, o fotomorfogénesis. La fotomorfogénesis son los cambios morfológicos inducidos por radiación solar o por UV. Los cambios incluyen, por ejemplo, disminución en el tamaño de las plantas, incremento del grosor de las hojas, cambios en la arquitectura de las ramas, así como alteraciones en los tiempos de floración o producción de semillas^{15,19}. Paradójicamente, tanto las plantas como los hongos utilizan a la radiación UV como una señal o clave ambiental que controla la formación de órganos. La lignina, los **flavonoides** y los fenoles, están presentes en las plantas expuestas a bajos niveles de UV. Sin embargo, el incremento en las concentraciones de algunos de estos compuestos, o el cambio en la estructura de las plantas, o en las características físicas de los órganos de las plantas (como el incremento en la dureza de las hojas) afecta, por un lado, la capacidad de consumo de los herbívoros²⁰ y, por otro, la degradación por los microorganismos que están en el suelo y que descomponen las hojas¹⁹. Por lo tanto, la producción de compuestos que absorben la radiación UV tiene consecuencias en procesos tróficos, incluidos herbivoría, descomposición y ciclaje de nutrientes. Asimismo, la radiación UV-B es uno de varios factores ambientales que influyen en la biodiversidad de microorganismos²¹ y los cambios en los patrones de biodiversidad pueden afectar el proceso de descomposición de materia orgánica lo cual afecta el potencial de secuestro de carbono en los ecosistemas terrestres y el flujo de CO₂ a la atmósfera^{15,21}.

1.3 Ecosistemas semiáridos

En ecosistemas áridos y semiáridos de la Patagonia Argentina y el norte de Chile se ha reportado que los cambios en la radiación UV-B tienen consecuencias en los procesos del suelo, ya sea alterando la comunidad de microorganismos del suelo²², aun cuando estos organismos no siempre están directamente expuestos a la radiación UV. Un mecanismo a través del cual la radiación UV puede alterar a los hongos y bacterias del suelo es a través del cambio en los exudados que se liberan de las raíces de las plantas en el suelo¹⁷. Un segundo mecanismo más estudiado tiene que ver con los cambios en la calidad de la hojarasca^{23,24}. Estos



En zonas con alta incidencia de UV-B las plantas muestran una fotoprotección estructural, como estos individuos de *Espeletia schultzii* (frailejones) en los páramos altoandinos de Colombia, que presentan un aspecto lanudo y blanquecino para reflejar la radiación. Foto Aurora Gaxiola

estudios han demostrado que las hojas que estaban expuestas a radiación UV en la planta, tardaban hasta el doble en descomponerse cuando caían al suelo²⁴. Por otro lado, en el norte de Chile, hemos reportado cómo la radiación UV cambia la calidad de la hojarasca, al incidir sobre los enlaces de la lignina (un compuesto de carbono que muy pocos microorganismos pueden digerir) y alterar la composición química de la hojarasca, y aunque sea sorprendente, favorecer la descomposición. A este proceso en el que la radiación UV altera la química de las hojas, se le conoce como fotodegradación o fotodescomposición²³. Los efectos de la fotodescomposición varían entre las especies^{23,25}, y aun no entendemos bien los mecanismos que explican este patrón. Lo que podríamos afirmar, es que el ciclo

de carbono y nitrógeno en ecosistemas semiáridos se pueden alterar no solamente debido al incremento en intensidad de radiación UV que llega a la superficie, sino por el tiempo de exposición al que las plantas y microorganismos están expuestos.

Los estudios en ecosistemas terrestres, y principalmente en ecosistemas semiáridos, están empezando a mostrar que los cambios en la cantidad de radiación UV-B que incide sobre la superficie terrestre, puede afectar las condiciones físicas y químicas del suelo, los organismos^{26,27} los procesos ecosistémicos^{28,29}. Por ejemplo, el incremento en la radiación UV-B puede alterar el ciclaje de nutrientes, a través de incrementar la descomposición fotoquímica de compuestos



Experimento de fotodegradación de hojarasca en el norte de Chile (Parque Nacional Fray Jorge). Foto Aurora Gaxiola

como la lignina y / o alterando la comunidad de microorganismos descomponedores y por lo tanto el proceso de descomposición³⁰. Asimismo, la radiación UV incide en las moléculas de lignina y otros compuestos de carbono y a través del proceso de fotodegradación, se pierde carbono a la atmósfera³¹. El incremento de los periodos secos y calientes en ecosistemas semiáridos puede disminuir el potencial de secuestrar carbono y de mantener nitrógeno disponible de estos ecosistemas. Aún no tenemos clara la función de la fotodegradación como vector de pérdida de carbono; sin embargo, tenemos que considerar que los ecosistemas áridos ocupan el 40% de la superficie terrestre, y se encuentran entre los ecosistemas más vulnerables a los impactos del cambio global³².

2. Radiación UV y sus efectos en ecosistemas dulceacuícolas

La radiación UV también actúa sobre los organismos acuáticos, provocando los mismos efectos perjudiciales que los descritos para los organismos terrestres. En concreto, se han observado algunos efectos negativos del exceso de radiación UV sobre el desarrollo embrionario o el crecimiento de diversos organismos acuáticos como microcrustáceos, anfibios y peces³³. En los anfibios, el aumento de la radiación UV en combinación con las infecciones causadas por hongos, puede llegar a ser letal, observándose una elevada mortalidad en embriones de diferentes especies de ranas³⁴.

Los efectos letales y subletales de la radiación UV sobre los organismos de agua dulce pueden, además, causar cambios importantes en la estructura y el funcionamiento de estos ecosistemas. Por ejemplo, la producción de energía está mediada por algas microscópicas que forman el fitoplancton y las plantas acuáticas sumergidas, grupos para los cuales se han descrito efectos nocivos de la radiación UV. La radiación UV tiene el potencial de reducir la producción primaria de los ecosistemas acuáticos de agua dulce y causar un efecto dominó sobre otros organismos acuáticos, alterando así los ciclos biogeoquímicos como el ciclo del carbono. No obstante, los efectos nocivos de la radiación UV en los ecosistemas acuáticos se ven atenuados por el efecto que ejerce la columna de agua, en especial porque este tipo de radiación es absorbida por el carbono orgánico disuelto (COD)³⁵.

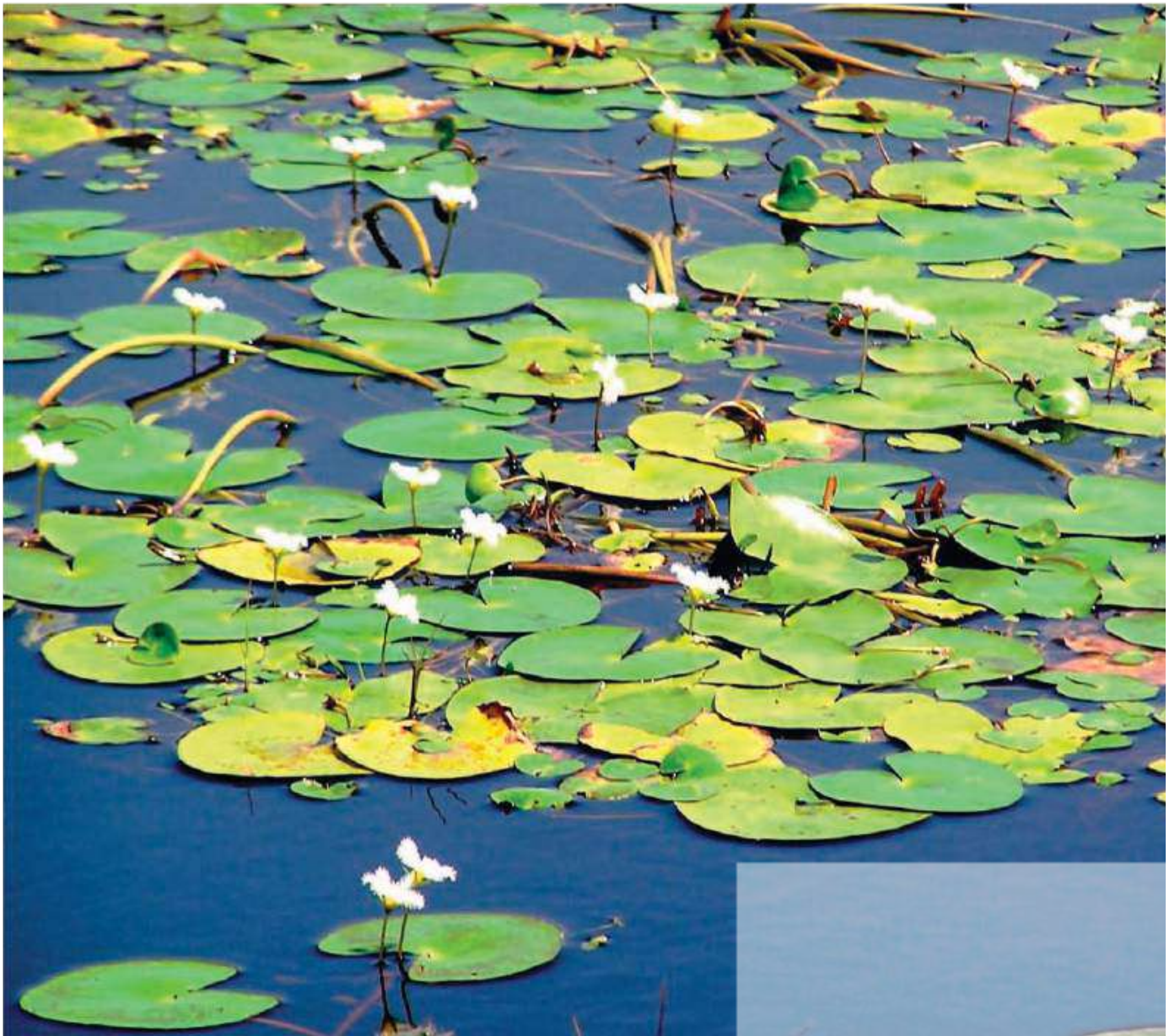
EL COD está compuesto de varias moléculas orgánicas que son liberados durante la descomposición de los cadáveres y que, debido a su alta solubilidad en agua, permanece disuelto en el medio acuático. Un ejemplo de este COD en nuestra vida diaria es el café que bebemos, que es básicamente carbono orgánico liberado en el agua desde las semillas de la planta. Los ecosistemas acuáticos de agua dulce son generalmente ricos en COD, haciendo que esto sea una de las principales reservas de carbono en la tierra. Las moléculas de carbono disueltas son muy complejas, y se conocen en general como sustancias húmicas. Constituyen la base del “humus”, que usamos en los jardines para mejorar la producción de las plantas. Estas sustancias húmicas absorben la luz visible, dando lugar al color oscuro de muchos ecosistemas acuáticos de agua dulce (de color té)³⁵. Del mismo modo, las sustancias húmicas también absorben la radiación UV, alterando su penetración y por lo tanto se reduce su potencial nocivos sobre los organismos.

La radiación UV afecta directamente a la estructura y composición del COD. La radiación UV actúa sobre las moléculas de carbono, rompiendo enlaces químicos en un proceso conocido como fotodegradación. La fotodegradación del COD da lugar a moléculas inorgánicas oxidadas de carbono tales como dióxido de carbono (CO₂)

y monóxido de carbono (CO), en un proceso conocido como foto-oxidación. La radiación UV es capaz de oxidar en sólo 24 horas el 3% del COD³⁶. Estas tasas tan elevadas ocurren especialmente en los ecosistemas de agua dulce tropicales, donde la alta radiación de combina con una alta concentración de COD en el agua³⁶.

El aumento de radiación UV también genera la fotodegradación de moléculas orgánicas pequeñas como hidratos de carbono o aminoácidos pequeños. El resultado es una mayor disponibilidad de nutrientes que son asimilados fácilmente por los microorganismos presentes en el agua o bacterioplancton. El bacterioplancton puede ser consumido a su vez por organismos más grandes como los protozoos de vida libre, y estos por microcrustáceos como la pulga de agua (*Daphnia sp*) que son la dieta básica de muchos peces de agua dulce. Los efectos de la fotodegradación de los compuestos orgánicos se manifiestan, por tanto, en las redes tróficas. Esto podría llevar a pensar que el aumento de la radiación UV puede tener un efecto positivo en la producción primaria de peces. Sin embargo, gran parte de los nutrientes absorbidos por bacterioplancton no se utiliza para el crecimiento y se convierte en CO₂. Se estima que la eficiencia de conversión de COD en la biomasa microbiana es del 25% lo que significa que el resto se emite en forma de CO₂ a la atmósfera amplificando el efecto invernadero que comentábamos anteriormente. De hecho, hay evidencias en lagunas costeras en el sudeste de Brasil que indican que un crecimiento del 200% en el fitoplancton, desencadenado por fotodegradación de COD, duplica la tasa de respiración y las emisiones de CO₂ a la atmósfera³⁷.

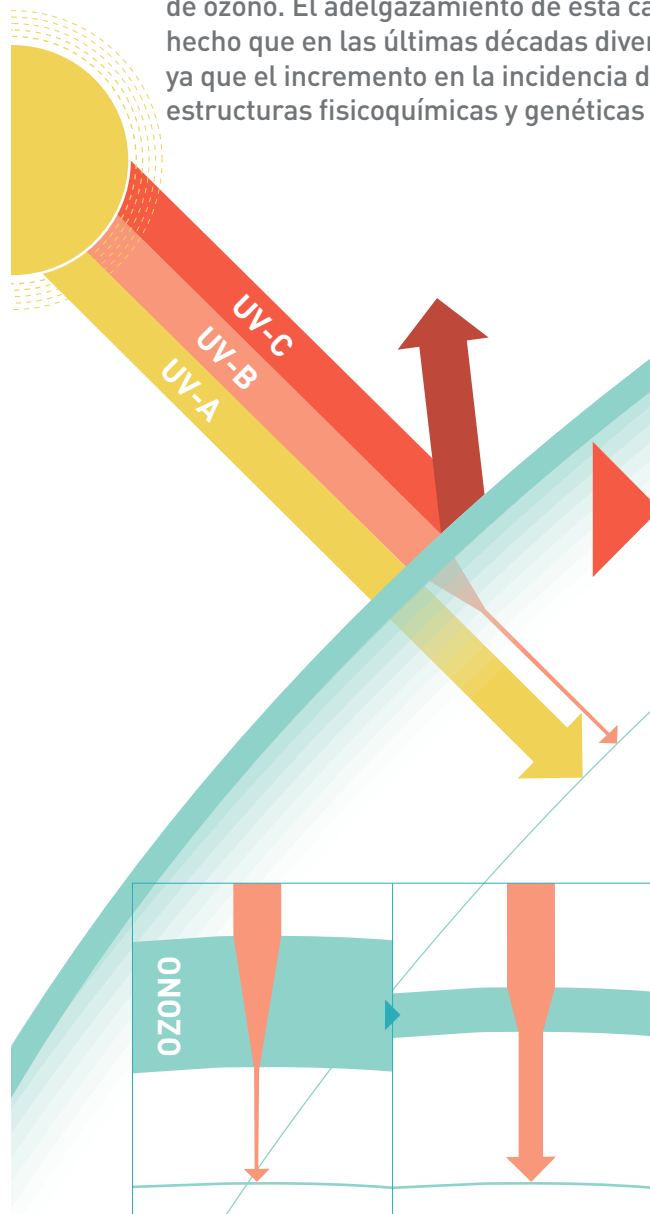
La acción de la radiación UV sobre el COD también es capaz de producir compuestos nocivos para los ecosistemas acuáticos y las comunidades biológicas que las habitan. Entre estos compuestos cabe destacar el peróxido de hidrógeno (H₂O₂)³⁸. La acción oxidante de este compuesto es capaz de liberar metales pesados de la materia orgánica disuelta en el agua de modo que pueden ser absorbidos por los organismos y que en altas concentraciones pueden ser letales. El peróxido de hidrógeno también actúa directamente sobre los microorganismos, inhibiendo sus



El Río Negro debe este nombre a las elevadas cantidades de sustancias húmicas (fracción disuelta en el agua del humus) que absorben la luz solar y confieren el color oscuro a sus aguas. Estas sustancias húmicas también interactúan con la radiación UV produciendo CO_2 y alterando el funcionamiento de las cadenas alimentarias de estos ecosistemas acuáticos³⁹. Foto Vinicius F. Farjalla

EFFECTOS DE LA RADIACIÓN UV EN LOS ECOSISTEMAS

La radiación solar es esencial para la vida en nuestro planeta, proporcionando energía a través de numerosos procesos bioquímicos. Uno de sus componentes es la peligrosa radiación ultravioleta, que es filtrada en gran parte por la capa de ozono. El adelgazamiento de esta capa, producto de la acción humana, ha hecho que en las últimas décadas diversos ecosistemas se vean afectados, ya que el incremento en la incidencia de radiación UV altera las estructuras fisicoquímicas y genéticas de los organismos.



LOS RAYOS ULTRAVIOLETA SE DIVIDEN EN TRES CLASES: UV-A, UV-B Y UV-C

La primera es esencial para nuestra vida (por ejemplo, promueve el metabolismo de la vitamina D), mientras que la última es la más perjudicial. La capa de ozono filtra la radiación más peligrosa y deja pasar a la superficie de la Tierra la que utilizan los seres vivos.

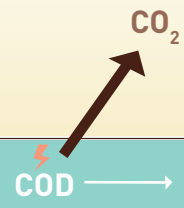
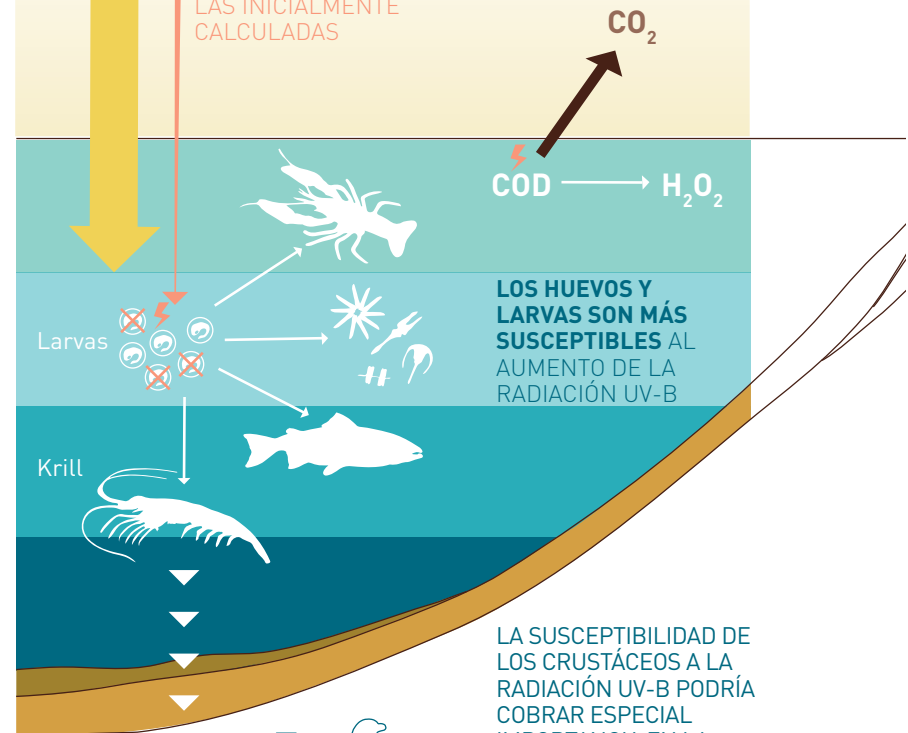
EL ADELGAZAMIENTO DE LA CAPA DE OZONO INCREMENTA PRINCIPALMENTE LA CANTIDAD DE RADIACIÓN UV-B QUE LLEGA A LA TIERRA

En 2015, con un adelgazamiento del 1%, la radiación UV aumentó en el hemisferio sur, alcanzando un 20% en Patagonia y otros sectores de Sudamérica y el 10% en Buenos Aires.

UV EN SISTEMAS ACUÁTICOS

Otro de los efectos negativos del aumento de la radiación UV es que afecta el desarrollo embrionario y crecimiento de numerosos organismos acuáticos -como algas, crustáceos, anfibios, corales y peces-, causando cambios importantes en la composición de la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos.

LA RADIACIÓN UV PUEDE PENETRAR PROFUNDIDADES MUCHO MAYORES A LAS INICIALMENTE CALCULADAS

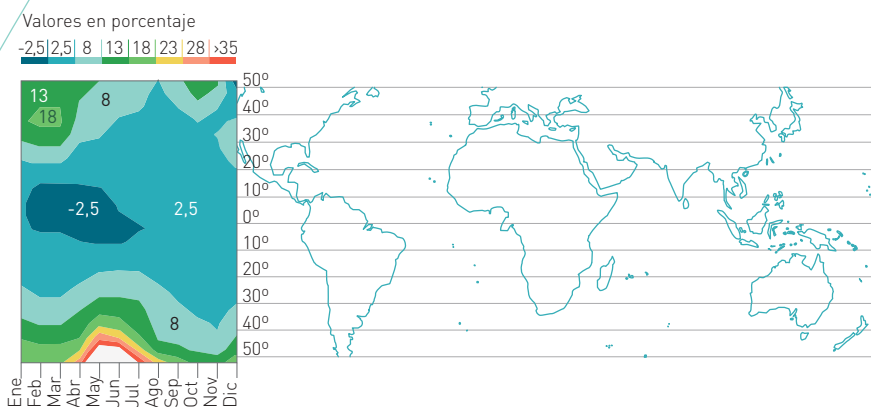


LOS HUEVOS Y LARVAS SON MÁS SUSCEPTIBLES AL AUMENTO DE LA RADIACIÓN UV-B

LA SUSCEPTIBILIDAD DE LOS CRUSTÁCEOS A LA RADIACIÓN UV-B PODRÍA COBRAR ESPECIAL IMPORTANCIA EN LA DRÁSTICA DISMINUCIÓN DEL KRILL

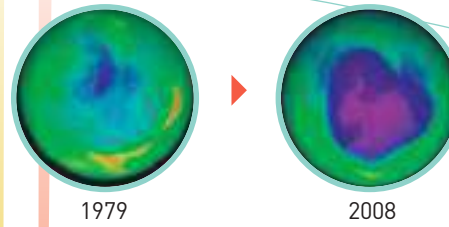
en el océano Atlántico detectada entre 1970 y 2003, período en el que la radiación UV incrementó drásticamente en el hemisferio sur. Estos pequeños crustáceos son un componente clave en la trama trófica de muchos animales, por lo que su escasez representa un gran desequilibrio en los ecosistemas marinos.

Cambio mensual de la radiación UV 1979-2008



SE ESPERA QUE ALREDEDOR DEL AÑO 2027 LAS DIMENSIONES DE LA CAPA DE OZONO SE HAYAN RECUPERADO

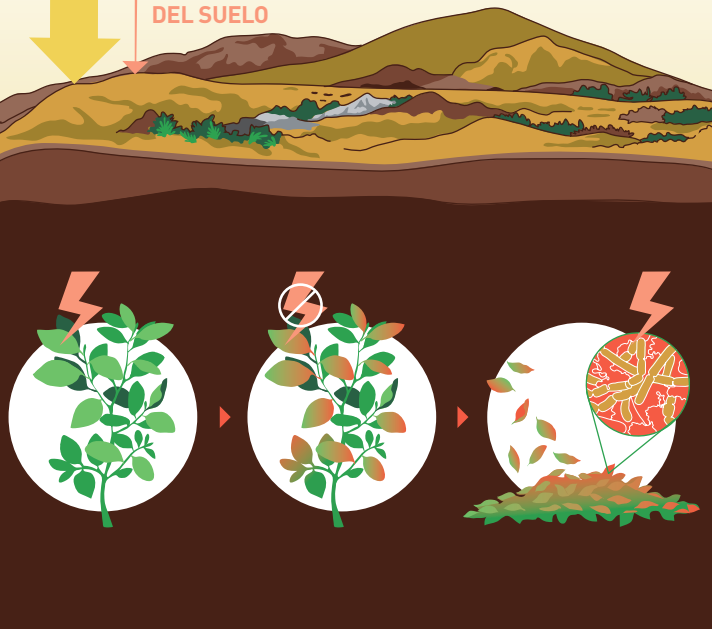
El Protocolo de Montreal es un tratado global suscrito el 16 de septiembre de 1987 que tiene como objetivo proteger la capa de ozono mediante el control de la producción de clorofluorocarbonos (presentes en aerosoles y sistemas refrigerantes, por ejemplo), sustancias que destruyen el ozono de la atmósfera.



UV EN PLANTAS

El aumento de la radiación UV genera un incremento de la producción de sustancias protectoras en las hojas que, debido a su composición química, provocan que los herbívoros no las consuman y que retrasan su descomposición. La hojarasca puede tardar hasta el doble de tiempo en descomponerse, afectando a toda la cadena alimenticia y al ciclo de nutrientes, principalmente en ecosistemas áridos.

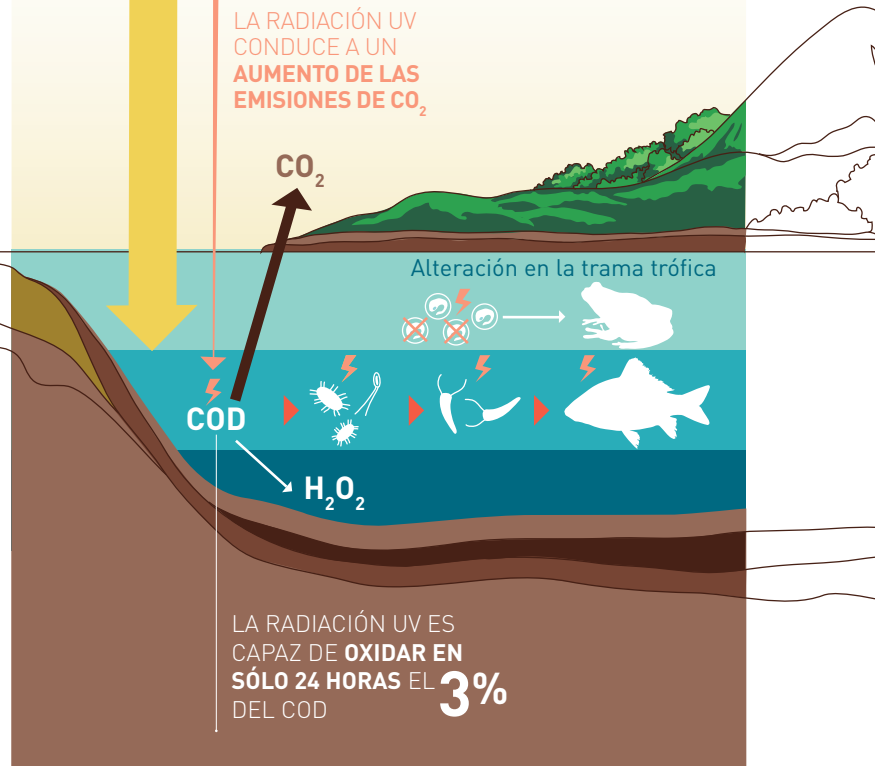
LA RADIACIÓN UV PUEDE INFLUIR EN LA ESTABILIDAD GENÉTICA DE LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO



UV Y CARBONO EN ECOSISTEMAS DE AGUA DULCE

La interacción de la radiación UV sobre el carbono orgánico disuelto (COD) en el agua de los ecosistemas dulceacuícolas produce compuestos nocivos, como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂), cuya acción libera metales pesados de la materia orgánica, y un aumento de las emisiones de CO₂, aumentando el efecto invernadero.

LA RADIACIÓN UV CONDUCE A UN AUMENTO DE LAS EMISIONES DE CO₂



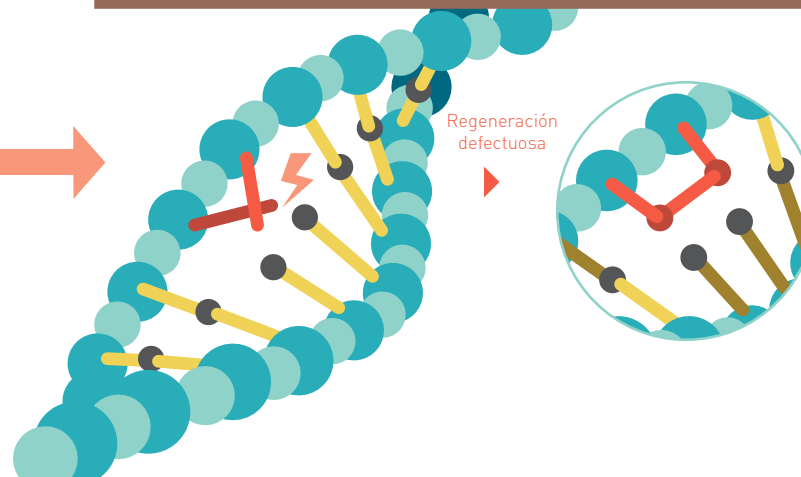
LA RADIACIÓN UV ES CAPAZ DE OXIDAR EN SÓLO 24 HORAS EL 3% DEL COD

DAÑO EN EL ADN

La radiación UV puede hacer que dos moléculas de timina se unan en forma incorrecta, lo que impide que el ADN se replique correctamente. Los seres vivos tienen la capacidad de reparar el ADN, pero el incremento en la intensidad de la radiación UV puede generar más daños de los que se pueden reparar.

RADIACIÓN UV

PROVOCA GRAVES DAÑOS EN EL ADN



tasas de crecimiento, aumentando las tasas de respiración. Por lo tanto, ya sea por acción directa sobre el COD o por la acción indirecta sobre los organismos, el aumento de la penetración de la radiación UV causado por el agotamiento de la capa de **ozono** conduce a un aumento de las emisiones de CO₂ por los ecosistemas acuáticos, lo que contribuye a su vez a acentuar el efecto invernadero y otros procesos asociados con el cambio climático.

Estos efectos van a ser más evidentes especialmente en algunos ecosistemas de Iberoamérica, como los de la cabecera del río Negro en Brasil. Estos lagos de altitud son especialmente vulnerables porque la potencia de la atmósfera sobre ellos es mucho menor que la de los sistemas situados a nivel del mar. Además, estos lagos poseen una baja concentración de materia orgánica disuelta por lo que el efecto filtro es mucho menor y la posibilidad de penetración de la UV mucho mayor. Estos efectos se transmiten a través de la cuenca hidrográfica y pueden llegar al río Negro y sus afluentes, donde la concentración de sustancias húmicas es alta y donde se espera un aumento en las tasas de emisión de CO₂³⁹.

3. UV en ecosistemas marinos

Ante el enorme impacto de la radiación UV sobre ecosistemas terrestres, inicialmente se minimizó la posible consecuencia sobre los organismos marinos, excepto sobre la zona costera, debido a que la radiación UV al igual que la luz se extingue al penetrar en el agua. Sin embargo, estudios recientes demuestran que la radiación UV puede penetrar a profundidades mucho mayores a las que inicialmente se habían calculado⁴⁰, y por lo tanto tiene consecuencias mucho mayores sobre la vida en el mar. Actualmente no tenemos dudas de que el aumento en la radiación UV que incide sobre el planeta tiene influencia sobre los ecosistemas marinos, alterando la actividad celular, el comportamiento y la supervivencia de los organismos.

Aunque todos los organismos se ven afectados por el aumento de la radiación ultravioleta, el efecto de la

radiación UV-B es particularmente agudo en pequeños organismos (como las microalgas), en macroalgas, corales, y peces y crustáceos. El efecto del aumento de la radiación UV-B sobre la mortalidad de los organismos marinos puede tener enormes incidencias en la abundancia de las poblaciones y las pesquerías (e.g. peces, crustáceos). La especial susceptibilidad de los crustáceos a la radiación UV-B detectada en un análisis global⁴⁰ podría relacionarse con la drástica disminución del krill en el océano Atlántico entre 1970 y 2003⁴⁰⁻⁴¹ período durante el cual aumentó la radiación UV-B en el hemisferio sur. Este es un ejemplo de como las consecuencias de los efectos de UV-B se propagan a actividades humanas y a los servicios que los ecosistemas nos proveen.

Los organismos marinos tienen ciclos de vida muy complejos, y no todas las fases de esos ciclos de vida son igualmente vulnerables a los efectos de la radiación UV. Experimentos realizados en Chile y en España por científicos del propio LINCGlobal demuestran que los huevos y las larvas de los organismos marinos son más susceptibles al aumento de radiación UV-B^{40, 42}. Estudios recientes también muestran la importancia de las conchas de moluscos como mecanismo de protección de la radiación UV-B. Por ejemplo, los moluscos son uno de los grupos menos afectados por la radiación UV-B⁴⁰. Es más, las larvas de moluscos que ya tienen la concha desarrollada tienen menor mortalidad que estadíos sin conchas⁴². Sin embargo, la mortalidad de las larvas de organismos marinos en general, expuestas a radiación UV-B, es extremadamente alta para la mayoría de las especies⁴² lo que podría tener consecuencias en la abundancia de las poblaciones de especies marinas, y en las pesquerías que estas sustentan. Aunque no existen evidencias directas que relacionen el efecto UV sobre huevos y larvas y estos a su vez sobre las capturas, existen algunos casos sugerentes como el colapso de las capturas de bacalao de Canadá a finales de los 80 aparentemente producto de sobrepesca. Sin embargo, este recurso nunca se recuperó a pesar de las vedas impuestas. Se ha sugerido alta susceptibilidad de los huevos y larvas de esta especie a radiación UV-B podrían haber retrasado la recuperación de esta población⁴³⁻⁴⁴. De modo que aún queda mucho por aprender de la

amplificación del efecto UV no solo sobre la especie afectadas en forma directa, sino sobre los efectos que los cambios que estas especies pueden tener sobre la dinámica de las poblaciones y las pesquerías.

Sin embargo, es importante considerar que aunque los estudios se hacen a nivel de especies, los efectos pueden propagarse a nivel ecosistémico, afectando a la cantidad de bienes y servicios que se obtienen. Por ejemplo, en zonas tropicales la presencia de arrecifes de coral se ha reducido significativamente. Aunque este hecho se ha relacionado con una mayor incidencia del El Niño, es importante considerar que ocurrieron simultáneamente con los más altos niveles de radiación UV-B registrados en el hemisferio sur⁴⁵. Pero también podría ocurrir un efecto conjunto de ambas fuentes de estrés ambiental: aumento de temperatura y UV-B. Se ha propuesto que la pérdida de pigmentos fotoprotectores como consecuencia de eventos de calentamiento (ver Capítulo 5, 7), haría más vulnerables a los corales al efecto de la radiación ultravioleta⁴⁶. Los arrecifes de coral proveen refugio a una alta diversidad y abundancia de organismos, propagando el efecto de UV a todo el ecosistema. La degradación de los arrecifes de coral conlleva también pérdidas de servicios de regulación, dada su importancia como barreras naturales frente a tormentas o a eventos climáticos extremos. Asimismo, existe una pérdida de servicios culturales y de ocio ya que son un atractor de turismo por concentrar altos niveles de biodiversidad que son un atractivo para buceadores.

El efecto de UV sobre crustáceos, como el krill, es otro ejemplo de como las consecuencias de la radiación ultravioleta puede propagarse al ecosistema. El krill es un componente clave de la trama trófica en sistemas polares. El efecto de la radiación UV sobre los organismos marinos constituye en sí una fuerza evolutiva que ha ido seleccionando individuos cada vez más resistentes a esta radiación. Sin embargo, este motor de selección natural ha operado preferentemente en aquellas áreas donde la incidencia de la radiación ha sido también mayor. Así, se observa una mayor cantidad de individuos resistentes en el hemisferio sur que en el norte. En el hemisferio sur la disminución de la capa de **ozono** entre 1979 y 1995 es

el doble que la observada en el Ártico⁴⁷. En primavera y verano la diferencia es aún mayor: cuatro veces menos concentración de **ozono** en el hemisferio sur que en el hemisferio norte. La comparación entre la respuesta de organismos marinos del hemisferio norte y sur a radiación UV-B nos muestran la rápida respuesta de los organismos marinos, adaptándose a los aumentos de radiación ultravioleta en el mar.

La evidencia científica muestra que los efectos sobre el comportamiento, la mortalidad, y la actividad celular han disminuido desde el año 1976⁴⁰. Esto demuestra la importancia de las adaptaciones de los organismos marinos a este nuevo escenario de radiación ultravioleta. Pero además, esta tendencia sugiere que en dos décadas se podría disipar el efecto de la radiación UV-B como consecuencia de la adaptación de los organismos marinos a esta fuente de estrés ambiental. Estos resultados podrían ser esperanzadores si le sumamos que existen evidencias de la recuperación de la capa de **ozono**. Sin embargo, esto no nos permite concluir que las amenazas para los organismos marinos vayan a desaparecer ya que son varias las fuentes de stress actúan sobre ellos y de manera simultánea como el aumento de la temperatura, los cambios en el pH o la hipoxia generada por proliferación excesiva de microalgas y bacterias debidas a la llegada de un exceso de fertilizantes a los océanos (ver Capítulo 3, 7).

La comunidad internacional se compromete a proteger la capa de ozono

En la década de los setenta, dos investigadores, Molina y Rowland identificaron los compuestos químicos responsables de catalizar la destrucción de la capa de ozono; conocidos por sus siglas CFC (Clorofluoro carbonos). Los CFCs se utilizaban principalmente en aerosoles y refrigerantes y catalizan la degradación del **ozono** en las capas altas de la atmósfera⁴⁸. La alarma mundial que se generó por la disminución de nuestro paraguas protector junto con el reconocimiento directo de la causa de este problema llevó a la firma, por parte

de todos los países miembros de las Naciones Unidas, del protocolo de Montreal en 1987. La firma del protocolo comprometió a los países industrializados a disminuir la producción de estos compuestos químicos con cloro, ya que es el cloro el elemento químico que destruye a las moléculas de **ozono**⁴⁸.

Si bien esta iniciativa mundial ha logrado frenar la acumulación de estos químicos nocivos, la disminución de la capa de **ozono** ha continuado porque estas moléculas son de larga vida y se requiere de muchos años para que se destruyan y desaparezcan de la atmósfera. La recuperación total de la capa de **ozono**, producto del exitoso cumplimiento del Protocolo de Montreal, ocurrirá en las próximas décadas. Sin ir más lejos en septiembre de 2017 el agujero de **ozono** fue excepcionalmente débil pero se espera que alrededor del año 2070 las dimensiones de la capa de **ozono** se hayan recuperado. Es importante considerar que hay otros componentes del cambio global, que podrían tener efectos “amplificadores” sobre la química del **ozono**⁴⁹ neutralizando los avances alcanzados hasta ahora. La recuperación de la capa de **ozono** es una demostración alentadora de que con voluntad política la comunidad internacional puede frenar y corregir los impactos de las actividades humanas sobre el planeta.

Cuando hablamos de los efectos “amplificados” nos referimos, por ejemplo, a los cambios en la nubosidad (asociados con el cambio climático) y las concentraciones de aerosoles que también pueden afectar la transmisión de la radiación UV a nivel regional o incluso global. La disminución de la nubosidad, o el incremento de la aridez (predicciones de algunos modelos de cambio climático para algunas regiones del planeta) pueden afectar la cantidad de radiación UV que incide sobre los organismos. Por otra parte, la deforestación o cambios en las prácticas agrícolas que alteran la estructura del dosel del bosque o disminuyen la cobertura vegetal podrían incrementar los niveles “normales” de UV al que están expuestas las plantas, animales (ej. anfibios, insectos), y los microorganismos (e.g. hongos y bacterias) del suelo en ecosistemas terrestres. Asimismo, en ambientes acuáticos la radiación UV puede penetrar a profundidades mucho mayores a las que inicialmente se habían calculado⁴⁰, y esto

podría afectar a un gran número de organismos debajo del agua. Por ejemplo en ecosistemas costeros la destrucción de bosques marinos, debido a la cosecha de macroalgas para proveer la creciente demanda de sus derivados (para industria alimenticia y cosmética) podría aumentar los niveles de UV a que están expuestos los invertebrados y peces que habitan esos productivos ecosistemas costeros.

4. Conclusiones

En este capítulo hemos presentado como la vida influye y se ve influida por la radiación UV a través de la capa de **ozono**. Las adaptaciones biológicas son un claro ejemplo de esta estrecha y compleja interacción. Sin embargo, las actividades humanas irrumpieron en este equilibrio alterando la capacidad de respuesta de los seres vivos, con consecuencias en el funcionamiento de los ecosistemas. La cooperación científica entre miembros de este Laboratorio Internacional evidencia las consecuencias de los impactos humanos, como el aumento de la radiación UV-B, sobre diversos ecosistemas y organismos. El control de los efectos nocivos de las actividades antrópicas, a través del protocolo de Montréal, constituye un ejemplo de cómo la voluntad y la colaboración entre países puede frenar los daños globales y conservar la biodiversidad en la Tierra.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 Caldwell, M. M. Plant Life and Ultraviolet Radiation: Some Perspective in the History of the Earth's UV Climate. *BioScience* 29, 520-526 (1979).
- 2 Murphy, T. M. Effects of UV radiation on nucleic acids. En D. S. Nachtwey, M. M. Caldwell, and R. H. Biggs, eds. *Impacts of Climatic Change on the Biosphere, Part 1: Ultraviolet Radiation Effects* (CIAP Monog. 5). U.S. Department of Transportation, Springfield, VA (1975).
- 3 Cnossen, I., Sanz-Forcada, J., Favata, F., Witasse, O., Zegers, T., & Arnold, N. F. Habitat of early life: Solar X-ray and UV radiation at Earth's surface 4–3.5 billion years ago. *J. Geophysical Research: Planets* 112 (E2) (2007).
- 4 Ries, W. Heller, H. Puchta, H. Sandermann, H. K. Seidlitz & Hohn, B. Elevated UV-B radiation reduces genome stability in plants. *Nature* 406, 98–101 (2000).
- 5 Juzeniene, A., & Moan, J. Beneficial effects of UV radiation other than via vitamin D production. *Dermato-Endocrinology* 4,109–117 (2012).

- 6 Mazza, C. A., Izaguirre, M. M., Zavala, J., Scopel, A. L., & Ballaré, C. L. Insect perception of ambient ultraviolet-B radiation. *Ecology Letters* 5, 722-726 (2002).
- 7 Kevan, P.G. *et al.* Limits to the salience of ultraviolet: lessons from colour vision in bees and birds. *J. Experimental Biology* 204, 2571-2580 (2001).
- 8 Weiss, D. Regulation of flower pigmentation and growth: multiple signaling pathways control anthocyanin synthesis in expanding petals. *Physiologia Plantarum* 110, 152-157 (2000).
- 9 Robinson, S. A., Turnbull, J. D., & Lovelock, C. E. Impact of changes in natural ultraviolet radiation on pigment composition, physiological and morphological characteristics of the Antarctic moss, *Grimmia antarctici*. *Global Change Biology* 11, 476-489 (2005).
- 10 Madronich, R. L. McKenzie, M. M. Caldwell & L. O. Björn, Changes in ultraviolet radiation reaching the Earth's surface, *Ambio* 24, 143-152 (1995).
- 11 Crutzen, P. J., & Arnold, F. Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: a major cause for the springtime 'ozone hole'. *Nature* 324, 651-655 (1986).
- 12 Herman, J. R. Global increase in UV irradiance during the past 30 years (1979-2008) estimated from satellite data. *J. Geophysical Research: Atmospheres* 115(D4) (2010).
- 13 Diepgen, T. L., & Mahler, V. The epidemiology of skin cancer. *British Journal of Dermatology* 146, 1-6 (2002).
- 14 New Zealand Ministry of Health.
- 15 Gwynn-Jones, P. Ecological roles of solar UV radiation: towards an integrated approach. *Trends in Ecology & Evolution* 18, 48-55 (2003).
- 16 Caldwell, M. M., Teramura, A. H., & Tevini, M. The changing solar ultraviolet climate and the ecological consequences for higher plants. *Trends in Ecology & Evolution* 4(12), 363-367 (1989).
- 17 Rozema, J., van de Staaij, J., Björn, L. O., & Caldwell, M. UV-B as an environmental factor in plant life: stress and regulation. *Trends in Ecology & Evolution* 12, 22-28 (1997).
- 18 Day, T. A. Relating UV-B radiation screening effectiveness of foliage to absorbing compound concentration and anatomical characteristics in a diverse group of plants. *Oecologia* 95, 54-550 (1993).
- 19 Ballaré, C., Barnes P. W., & Kendsrick, R. E. Photomorphogenic effects of UV-B radiation on hypocotyls elongation in de-etiolating tomato seedlings: I. The photoreceptor. *Physiol Plant* 93, 584-658 (1991).
- 20 Jansen, M. A. K., Gaba, V., & Greenberg, B. M. Higher plants and UV-B radiation: balancing damage, repair and acclimation. *Trends Plant Science* 3, 131-135 (1998).
- 21 Caldwell, M. M., Bornman, J. F., Ballaré, C. L., Flint, S. D., & Kulandaivelu, G. Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation, and interactions with other climate change factors. *Photochemical & Photobiological Sciences* 6, 252-266 (2007).
- 22 Ballaré, C. L., Caldwell, M. M., Flint, S. D., Robinson, S. A., & Bornman, J. F. Effects of solar ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems. Patterns, mechanisms, and interactions with climate change. *Photochemical & Photobiological Sciences* 10, 226-241 (2011).
- 23 Gaxiola, A., & Armesto, J. J. Understanding litter decomposition in semiarid ecosystems: linking leaf traits, UV exposure and rainfall variability. *Frontiers In Plant Science* 6, 140 (2015).
- 24 Pancotto, V.A., Sala, O.E., Cabello, M. *et al.* Solar UV-B decreases decomposition in herbaceous plant litter in Tierra del Fuego, Argentina: potential role of an altered decomposer community. *Global Change Biology* 9, 1465-1474 (2003).
- 25 Brandt, L. A., King, J. Y., & Milchunas, D. G. Effects of ultraviolet radiation on litter decomposition depend on precipitation and litter chemistry in a shortgrass steppe ecosystem. *Global Change Biology* 13, 2193-205 (2007).
- 26 Gallo, M.E. *et al.* Photoacceleration of plant litter decomposition in an arid environment. *Soil Biol. Biochemistry* 41, 1433-1441 (2009).
- 27 Henry, H.A.L. *et al.* Litter decomposition in a California annual grassland: Interactions between photodegradation and litter layer thickness. *Ecosystems* 11, 545-554 (2008).
- 28 Brandt, L.A. *et al.* Photochemically induced carbon dioxide production as a mechanism for carbon loss from plant litter in arid ecosystems. *J. Geophys. Res. Biogeoscience* 114, G02004 (2009).
- 29 Rutledge, S. *et al.* Photodegradation leads to increased CO₂ losses from terrestrial organic matter. *Global Change Biology* 16, 3065-3074 (2010).
- 30 Duguay, K. J. & Klironomos, J. N. Direct and indirect effects of enhanced UV-B radiation on the decomposing and competitive abilities of saprobic fungi. *Applied Soil Ecology* 14, 157-164 (2000).
- 31 Austin, A. T. Has water limited our imagination for aridland biogeochemistry?. *Trends in Ecology & Evolution* 26, 229-235 (2011).
- 32 Safriel, U. *et al.* Ecosystems and Human-Well Being: Current State and Trends, In *Dryland systems, Millenium Ecosystem Assessment* pp. 623-662 (2005).
- 33 Bancroft, B. A., Baker, N. J., & Blaustein, A. R. Effects of UVB radiation on marine and freshwater organisms: a synthesis through meta-analysis. *Ecology Letters* 10, 332-345 (2007).
- 34 Kiesecker, J. M., & Blaustein, A. R. Synergism between UV-B radiation and a pathogen magnifies amphibian embryo mortality in nature. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 92, 11049-11052 (1995).
- 35 Pace, M. L., & Cole, J. J. Synchronous variation of dissolved organic carbon and color in lakes. *Limnology and Oceanography* 47, 333-342 (2002).
- 36 Suhett, A. L., Amado, A. M., Bozelli, R. L., Esteves, F. A., & Farjalla, V. F O papel da foto-degradação do carbono orgânico dissolvido (COD) nos ecossistemas aquáticos. *Oecologia Brasiliensis* 10, 186-204 (2006).
- 37 Amado, A. M., Cotner, J. B., Suhett, A. L., Esteves, F. D. A., Bozelli, R. L., & Farjalla, V. F. Contrasting interactions mediate dissolved organic matter decomposition in tropical aquatic ecosystems. *Aquatic Microbial Ecology* 49, 25-34 (2007).
- 38 Cory, R. M., McNeill, K., Cotner, J. P., Amado, A., Purcell, J. M., & Marshall, A. G. Singlet oxygen in the coupled photochemical and biochemical oxidation of dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology* 44, 3683-3689 (2010).
- 39 Scofield, V., Melack, J. M., Barbosa, P. M., Amaral, J. H. F., Forsberg, B. R., & Farjalla, V. F. Carbon dioxide outgassing from Amazonian aquatic ecosystems in the Negro River basin. *Biogeochemistry* 129(1-2), 77-91 (2016).
- 40 Llabrés, M., Agustí, S., Alonso-Laita, P., & Herndl, G. J. Synechococcus and Prochlorococcus cell death induced by UV radiation and the penetration of lethal UVR in the Mediterranean Sea. *Marine Ecology Progress Series* 399, 27-37 (2010).
- 41 Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E., & Rothery, P. Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature* 432(7013), (2004).

- 42 Carreja, B., Fernández, M., & Agustí, S. Joint additive effects of temperature and UVB radiation on zoeae of the crab *Taliepus dentatus*. *Marine Ecology Progress Series* 550, 135-145 (2016).
- 43 Béland, F., Browman, H. I., Rodriguez, C. A., & St-Pierre, J. F. Effect of solar ultraviolet radiation (280–400 nm) on the eggs and larvae of Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56, 1058-1067 (1999)
- 44 Lesser, M. P., Farrell, J. H., & Walker, C. W. Oxidative stress, DNA damage and p53 expression in the larvae of Atlantic cod (*Gadus morhua*) exposed to ultraviolet (290–400 nm) radiation. *Journal of Experimental Biology* 204, 157-164 (2001).
- 45 McKenzie, R., Connor, B., & Bodeker, G. Increased summertime UV radiation in New Zealand in response to ozone loss. *Science* 285(5434), 1709-1711 (1999).
- 46 Häder, D. P., Kumar, H. D., Smith, R. C., & Worrest, R. C. Effects of solar UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochemical & Photobiological Sciences* 6(3), 267-285 (2007).
- 47 Weatherhead, E. C., & Andersen, S. B. The search for signs of recovery of the ozone layer. *Nature* 441, 39 (2006).
- 48 Andrady, A., Aucamp, P.J., Bais, A. F., Ballaré, C.L., Bjorn, L. O., *et al.* Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: Progress report, 2008. United Nations Environment Programme, Environmental Effects Assessment Panel, Photochem. Photobiol. Sci. 8,13-22 (2009).
- 49 Isaksen, I. S. A., Rognerud, B., Dalsøren, S. & Søvde, A. Stratospheric Ozone depletion and Tropospheric chemistry, in *Twenty Years of Ozone Decline. Proceedings of the Symposium for the 20th Anniversary of the Montreal Protocol* eds.: Zerefos C., Contopoulos G. and Skalkeas G., Springer, Netherlands, pp. 279-290 (2009).

REFERENCIAS COMENTADAS

Gaxiola, A., & Armesto, J. J. (2015). Understanding litter decomposition in semiarid ecosystems: linking leaf traits, UV exposure and rainfall variability. *Frontiers in Plant Science*. 6, 140.

Este estudio fue realizado por miembros del laboratorio y es parte de una línea que se ha desarrollado entre investigadores del CSIC-España y la PUC-Chile. El objetivo de este trabajo era mostrar como los efectos de la radiación UV sobre el ciclo del carbono en sistemas semiáridos varía entre especies de plantas y también en función de la disponibilidad de agua. El trabajo lo realizamos en Chile, en la frontera sur del Desierto de Atacama y lo que encontramos es que hay plantas que tienen hojas que pierden dióxido y masa de carbono al estar expuestas a radiación UV, pero hay plantas en las que eso no sucede. Asimismo, las hojas que pierden masa se descomponen más rápidamente. Aun no entendemos bien cuáles son las consecuencias de estos resultados para el ciclaje de nutrientes por lo que hemos continuando haciendo estudios en la zona semiárida de España.

Bancroft, B. A., Baker, N. J., & Blaustein, A. R. (2007). Effects of UVB radiation on marine and freshwater organisms: a synthesis through meta-analysis. *Ecology Letters*, 10, 332-345.

Este es un importante artículo de revisión sobre los efectos de la radiación UV sobre los organismos acuáticos dulcícolas. Los autores observaron que la radiación UV tuvo efectos siempre negativos, pero bastante variados en los organismos acuáticos. Tales efectos negativos fueron comunes para los diversos grupos de organismos analizados, con diferentes historias de vida, pertenencias a diversos niveles tróficos y presentes en diversos ecosistemas dulcícolas. Los autores también observaron que los efectos negativos más pronunciados fueron sobre las primeras fases del desarrollo de los organismos (embriones, por ejemplo). A pesar de siempre negativa, la gran variación de respuesta indica susceptibilidad diferenciada entre los diversos grupos en relación a la radiación UV, que puede tener importantes implicaciones en la conservación de diversos grupos en un mismo ecosistema.

Llabrés, M., Agustí, S., Fernández, M., Canepa, A., Maurin, F., Vidal, F., & Duarte, C. M. (2013). Impact of elevated UVB radiation on marine biota: a meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*. 22 131-144.

Este estudio es una revisión-metaanálisis, es decir, es un trabajo que analiza los resultados de muchos estudios con el fin de sintetizar lo que se sabe y se ha encontrado respecto a un tema. En particular el objetivo de este trabajo era evaluar cómo el incremento o cambios en la radiación UV incidente estaba afectando diferentes aspectos de los ecosistemas marinos. Este trabajo analizó los resultados de 1784 trabajos experimentales en diferentes áreas del mundo y considerando diferentes organismos, y lo que encontraron es que muchos trabajos científicos coinciden en que la radiación UV ha tenido un efecto negativo incrementando la mortalidad de corales, crustáceos, peces, etcétera. Este trabajo, es muy relevante pues nos permite identificar casos graves en donde podemos poner más atención y actuar de forma más eficiente.

GLOSARIO

Ozono. Gas compuesto por tres moléculas de oxígeno, presente en las capas superiores de la atmósfera en muy bajas concentraciones.

Kril. Son organismos muy pequeños parientes de los camarones, las langostas y las jaibas. De hecho, su nombre deriva del noruego, y significa pez pequeño.

Fotosistemas. Son proteínas organizadas en sistemas en las membranas de los organismos que producen su propio alimento (autótrofo), utilizando a la luz como principal fuente de energía.

Alótropo. Moléculas de el mismo elemento, por ejemplo, el ozono que contiene tres átomos de oxígeno, o el fósforo blanco que tiene cuatro átomos de fósforo.

Ácidos fenólicos. Son compuestos orgánicos que contienen un anillo fenólico y un ácido carboxilo, producidos por las plantas. Estas moléculas no son fáciles de digerir por los organismos que los consumen por lo que se considera que cumplen con una función de defensa al “alejar” a los consumidores.

Flavonoides. son compuestos orgánicos, producidos por las plantas y que se caracterizan por estar formados por 15 átomos de carbono, estas moléculas también son consideradas defensas (al igual que los ácidos fenólicos).

Lignina. Moléculas de carbono muy largas y complejas, son las que le dan dureza a la madera y son muy difíciles de digerir por los microorganismos. Taninos. compuestos fenólicos, que normalmente le dan color café al agua de los ríos.





Zona de los lagos en el sur de Chile, Puerto Montt. Se observa la fragmentación de los bosques y la transformación del paisaje debido a actividades agrícolas, ganaderas y forestales. Foto Pablo A. Marquet



Cerro Castillo, XI Región, Chile 2018. Foto Pablo Maldonado

Cambios en la disponibilidad de agua y su efecto sobre el funcionamiento de los ecosistemas

Francisco I. Pugnaire, Juan J. Armesto, Aurora Gaxiola, Pablo A. Marquet, Cristina Armas, Fernando Valladares y Olaf Malm

RESUMEN

Los cambios previstos en el clima van a afectar tanto directa como indirectamente al funcionamiento de las comunidades vegetales, con una incidencia más importante en climas de tipo árido y mediterráneo, donde la escasez de precipitaciones, las elevadas temperaturas que se alcanzan y la elevada radiación significan ya un impedimento para el crecimiento de las plantas, y donde las perturbaciones suponen un obstáculo para su recuperación. Muchos de estos sistemas incluyen, además, una elevada riqueza específica junto a altos índices de endemismo, por lo que conocer su funcionamiento se hace prioritario a la hora de tomar decisiones para paliar posibles efectos negativos del cambio climático para el mantenimiento de la diversidad.

1. El cambio climático y las plantas

La actividad humana tiene un impacto creciente sobre los ecosistemas, tanto directo, a través de cambios de uso del suelo y deforestación, como indirecto, a través de su influencia en el clima, mediada fundamentalmente por la emisión de gases de efecto invernadero. Entre los principales indicadores del actual cambio climático de origen humano se encuentra el aumento de temperatura media de la atmósfera y la alteración del régimen de precipitaciones. Pero mientras que las temperaturas medias se elevan de forma global en el planeta, las lluvias se tornan escasas en algunos territorios y excesivas en otros, afectando de manera muy profunda al funcionamiento de los ecosistemas.

La acumulación de gases con efecto invernadero ya ha dado lugar a un incremento apreciable de temperatura en los últimos 100 años (casi 1°C de media), con un incremento de la variabilidad climática y cambios en el régimen de precipitaciones, según indica el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC¹). Todo ello está afectando especialmente a los ecosistemas mediterráneos, así como a los de latitudes altas y zonas de montaña, modificando aspectos clave como son los periodos de actividad y crecimiento de las plantas, la productividad primaria, la capacidad de resistir y sobreponerse a otras perturbaciones como los incendios o la contaminación². Dada la íntima relación que existe entre las plantas y el clima, que se manifiesta en su distribución

geográfica y en la multitud de adaptaciones que se observan en las distintas regiones climáticas de la Tierra, todos los efectos que la actividad humana genera sobre el clima tienen un fuerte impacto sobre las comunidades vegetales. Esto a su vez repercute en los bienes y servicios que obtenemos de los sistemas naturales.

La disponibilidad de agua para las plantas es el resultado no sólo de la precipitación total, sino de cuándo llueve (incluyendo la estacionalidad de las lluvias y su variabilidad) y del balance entre lo que entra y lo que sale del sistema. Este ciclo hidrológico puede verse alterado porque en las salidas de agua intervienen procesos naturales, como la escorrentía superficial o la infiltración, pero también procesos derivados una vez más de la actividad humana, como son cambios en el uso del suelo y, con frecuencia, sobrexplotación de los recursos hídricos. De hecho, dada la desigual distribución de la población humana en el planeta y su querencia por zonas relativamente secas y soleadas, muchos ecosistemas situados en estas regiones están sufriendo el doble impacto de un ciclo de precipitaciones alterado y una disponibilidad de agua superficial y en el subsuelo disminuida por el consumo humano.

Aquí nos centraremos fundamentalmente en la incidencia del cambio climático en el ciclo hidrológico y su repercusión sobre todo en las plantas. Sin embargo, conviene recordar que el impacto de la intervención humana sobre los recursos hídricos es tanto mayor cuanto más seca y poblada sea la zona.

2. Escenarios de cambio climático

Lo que nos depara el futuro respecto a cambios en el clima y sus efectos sobre el ciclo del agua en el planeta dependerá tanto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera como de su concentración y persistencia. Estos gases se producen como consecuencia tanto de procesos que ocurren dentro de los organismos (como la respiración, que genera CO₂, o la acción de los microorganismos en el tubo digestivo, que genera metano)

como consecuencia de un gran número de procesos industriales y la quema de compuestos orgánicos como la madera y el petróleo, que producen CO₂. En general, la intensidad de la emisión de GEI y la concentración que alcancen en la atmósfera depende de factores ambientales, socio-económicos y tecnológicos difíciles de anticipar. La incertidumbre respecto a cómo se comportarán o qué trayectoria seguirá la concentración de gases de efecto invernadero en el futuro ha llevado a la comunidad de científicos que modelan el clima del planeta a usar distintos escenarios. Estos científicos se agrupan en lo que se conoce el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

Este panel y la comunidad científica internacional han trabajado en tres fases 1) desarrollando escenarios o trayectorias de los principales agentes que fuerzan el clima (emisiones, concentraciones y cambios en el uso de la tierra) de acuerdo con la literatura científica disponible; 2) usando las tendencias de las emisiones, concentraciones y usos del suelo obtenidos en la fase anterior por parte de los modeladores del clima para llevar a cabo experimentos y simulaciones que permitan generar nuevos escenarios, y 3) integrando los resultados anteriores en función de un rango de potenciales avances en el ámbito de la tecnología, desarrollo socioeconómico y adopción de políticas que hagan más o menos probable una trayectoria u otra. Se adoptaron 4 escenarios conocidos como Trayectorias Representativas de Concentración, o RCP por sus siglas en inglés que incluyen cuatro escenarios diferenciados conocidos como RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5, en los que su nombre alude al forzamiento radiativo (FR) de cada uno de éstos escenarios, al comparar el año 2100 con valores pre-industriales. El FR se define como la diferencia entre la energía radiante recibida por la tierra y aquella reflejada de regreso al espacio, por lo que valores positivos implican calentamiento y negativos enfriamiento del sistema. Así, por ejemplo, el escenario RCP2.6 implica que en 2100 la tierra se habrá calentado en promedio 2.6 W/m² sobre la situación pre-industrial, lo que supone un aumento de temperatura de unos 2°C. Estos modelos también hacen proyecciones sobre la precipitación a nivel global, y se van adaptando gradualmente a niveles regionales o locales cada vez con mayor precisión.

2.1 Cambios en las precipitaciones

Los modelos de circulación general de la atmósfera predicen cambios significativos a nivel regional y local en la frecuencia y magnitud de los eventos de precipitación. Los cambios en la atmósfera se han traducido en un aumento de eventos extremos que provocan lluvias torrenciales e inundaciones en muchos lugares y, paralelamente, en un menor número de eventos de lluvia. Es decir, sequías más intensas y prolongadas asociadas a un aumento de la torrencialidad que conduce a una mayor erosión y a la degradación del suelo. Esto está ocurriendo en numerosas zonas secas del planeta, como en las regiones de clima mediterráneo y en regiones áridas de África y Asia. Estos eventos extremos, por su carácter devastador y porque conllevan alteraciones importantes en la disponibilidad de agua para las plantas, tienen impactos importantes en la capacidad de los ecosistemas de mantener su productividad, diversidad y funcionamiento.

Un elemento importante pero menos conocido y pobremente explorado por los modelos globales son los efectos del cambio climático sobre los patrones temporales de precipitación. Para muchos ecosistemas es tan importante, o más, cuándo y cómo llueve que cuánto llueve. Cambios en la distribución temporal de las precipitaciones (entre las distintas estaciones del año y entre años), con independencia de que estos cambios afecten o no a la precipitación total anual, pueden tener enormes consecuencias en los ecosistemas. Es decir, incluso si la precipitación total no varía, cambios en su distribución estacional y las fluctuaciones entre años afectan al crecimiento de las plantas, a su regeneración³, así como las interacciones entre especies, tanto vegetales como animales, y en conjunto al funcionamiento de todo el ecosistema. El efecto de los cambios en las precipitaciones (cuándo, cuánto, cómo) sobre algunos ecosistemas es particularmente crítico. Por ejemplo, los modelos climáticos predicen mayor aridez en climas de tipo mediterráneo, donde también se concentra gran parte de la población humana que altera los ciclos hidrológicos, y gran parte de la biodiversidad del planeta.



En la zona más elevada de las montañas las plantas comparten un clima de características extremas ayudándose con frecuencia unas a otras; por ejemplo, creciendo sobre otras plantas en cojín apegadas al sustrato, disminuyendo los efectos perjudiciales del viento. El equilibrio entre plantas que conviven estrechamente puede verse alterado bajo unas nuevas condiciones ambientales, afectando directamente a la biodiversidad de estas zonas. Foto Francisco I. Pugnaire

3. Consecuencias para el funcionamiento de los ecosistemas

El aumento de la temperatura del aire y la menor disponibilidad de agua en los suelos afectarán a la capacidad fotosintética y al crecimiento de las plantas, pudiendo modificar la forma en que interactúan entre ellas y con otros organismos, y por tanto en la composición de la comunidad y su diversidad. Por ejemplo, simulaciones de cambio climático en la zona alpina de Sierra Nevada (España) donde se usaron cámaras transparentes para subir la temperatura media del aire entre 1 y 2°C provocaron un aumento de la tasa de fotosíntesis, pero también de la de respiración, produciendo un balance negativo en la fijación de CO₂. Es decir, la productividad de este ecosistema se verá disminuida y su estabilidad a largo plazo comprometida. Además, una temperatura más alta dio lugar a una mayor pérdida de agua, lo que en conjunto produjo un menor crecimiento de las plantas⁴.

Además de los efectos directos sobre los componentes más visibles de los ecosistemas, como la vegetación o los



En los ecosistemas más áridos las micorrizas juegan un papel primordial para el mantenimiento de la vegetación, proporcionando agua y nutrientes a las plantas. Foto Francisco I. Pugnaire

animales, el cambio climático afecta al suelo, incluyendo tanto a los ciclos biogeoquímicos (ver Capítulo 6) que tienen lugar en él como a la compleja y aún poco conocida red trófica de organismos del suelo. En los suelos, los microorganismos y pequeños invertebrados son responsables de procesos muy importantes, como la descomposición de los organismos muertos y los excrementos o la mineralización del nitrógeno, muy sensibles a las variaciones de temperatura y disponibilidad hídrica. Un incremento de la temperatura y la concentración de CO_2 de la atmósfera estimula el crecimiento de las plantas. Sin embargo, la evidencia

disponible muestra que ese crecimiento potencial se ve pronto contrarrestado por factores como la menor disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo. Así, la escasez de agua afecta la mineralización de la materia orgánica, afectando directamente la disponibilidad de nutrientes para las plantas, e indirectamente el crecimiento y la productividad del ecosistema.

El cambio climático puede también originar una cascada de modificaciones en los ecosistemas, algunos muy importantes y poco perceptibles, como los procesos que ocurren bajo el suelo. Por ejemplo, se puede esperar que

La *Bromeliacea* del género *Puya*, parte importante de los ecosistemas mediterráneos de Chile central. Foto Pablo A. Marquet





Muchos de estos grupos de plantas de hojas o tallos suculentos son endémicos de regiones de clima Mediterráneo o estacionalmente seco, como el género *Copiapoa* en el desierto chileno. Foto Juan J. Armesto

bajo condiciones más secas como consecuencia del cambio climático se alteren las asociaciones de hongos y plantas para formar micorrizas. En experimentos a largo plazo en el sur de España en los que se alteraron los patrones de precipitación, se encontró que un tipo particular de micorrizas, las vesículo-arbusculares, responden de diferente manera dependiendo de la intensidad de la sequía⁵. En concreto, el número de vesículas disminuyó a medida que bajaba la precipitación y el número de estructuras fúngicas llamadas arbusculos aumentó con las alteraciones estacionales, pero disminuyó a medida que disminuía la precipitación media anual. Como consecuencia, la funcionalidad de la micorriza puede cambiar con las

alteraciones climáticas, así como su interacción con la planta, pudiendo afectar su supervivencia a medio o largo plazo. Estos ejemplos muestran el impacto indirecto de las alteraciones del clima sobre la dinámica de las comunidades vegetales a través de efectos sobre el suelo.

4. Ecosistemas mediterráneos

A pesar de su limitada extensión territorial, los ecosistemas mediterráneos están entre los más ricos del planeta en términos de diversidad biológica. En menos del 5% de la superficie terrestre, repartida en pequeñas

áreas en los cinco continentes, se encuentra un 30% de la diversidad global; es decir, más de 48.250 especies de plantas vasculares⁶. Las condiciones peculiares del clima mediterráneo, sujeto a prolongadas sequías de verano, la limitación de nutrientes debido a suelos pobres, y la elevada incidencia de incendios han determinado que estos ambientes sean dominados por una gran diversidad de especies con adaptaciones notables para tolerar estos distintos factores de estrés. En los ecosistemas mediterráneos es notable la presencia de arbustos, y muchos de ellos, así como muchas especies herbáceas anuales, tienen semillas que germinan en respuesta al fuego. Por el contrario, otras especies son capaces de rebrotar a partir de sus raíces tras sufrir daños en un incendio. Además, numerosas especies arbustivas tienen hojas duras y longevas (esclerófilas) que retienen los escasos nutrientes disponibles por mucho tiempo como forma de “amortizar” la inversión que supone producirlas. Algunas plantas, por el contrario, escapan de los efectos de la desecación debido a que pierden total o parcialmente su follaje en épocas secas y lo vuelven a producir en invierno o primavera. Estas especies caducifolias de verano están activas durante un corto período del año, hasta la llegada de la sequía estival. Otras especies muestran estrategias diferentes, y almacenan agua en sus tejidos. Se denominan en general suculentas, y entre ellas se encuentran las cactáceas y bromelias terrestres.

La diversidad biológica de las zonas mediterráneas se ve incrementada por la presencia de “refugios”, hábitats restringidos como fondos de quebradas, o laderas húmedas, donde se concentran especies con requerimientos más altos de humedad del suelo, con frecuencia endémicas. Un claro ejemplo son los ‘canutos’ del Parque Natural de los Alcornocales, en Cádiz (España), donde todavía se encuentran especies de la época Terciaria, como el rododendro. Esta alta diversidad y numerosos endemismos ha llevado a incluir las zonas de clima mediterráneo del mundo en la serie de áreas prioritarias para conservación de la biodiversidad global⁷. A esto se añade el alto grado de amenaza de la flora de estas regiones debido a la masiva ocupación del espacio por las grandes ciudades, el turismo, el desarrollo de nuevos cultivos agrícolas y

forestales, y la creciente frecuencia de incendios causados directa o indirectamente por el hombre.

Las enormes amenazas y la susceptibilidad de los ecosistemas mediterráneos al **cambio global**, hace anticipar pérdidas importantes de su biodiversidad⁸. Los ecosistemas naturales en las zonas de clima mediterráneo alcanzan actualmente una cobertura inferior al 10% de su área original⁹ y menos de un 4% del total se encuentra protegida¹⁰. La capacidad de respuesta de los ecosistemas mediterráneos al cambio climático está limitada por la pérdida de especies y de variabilidad genética. Estos ecosistemas están entre los que históricamente han sufrido mayor reducción y fragmentación de su superficie por la acción humana, lo que ha resultado en importantes reducciones de tamaño de las poblaciones de plantas y animales y pérdidas de biodiversidad a escala local, regional y global. No obstante, es mucha más la biodiversidad que puede perderse en un futuro próximo, reduciendo aún más la capacidad de los ecosistemas de recuperarse. De hecho, existen evidencias de que la productividad y la provisión de muchos servicios ecosistémicos dependen en gran medida de la biodiversidad presente en el ecosistema¹¹. A su vez, las pérdidas de diversidad pueden acentuar los impactos de catástrofes como incendios o sequías, con efectos negativos adicionales sobre la biodiversidad y pérdida del potencial adaptativo de la vegetación nativa en una espiral que amenaza seriamente tanto la integridad del sistema como la vida humana en estas zonas.

En estas condiciones, un tema de gran interés para los ecólogos es cómo lograr la restauración de los ecosistemas mediterráneos degradados por la acción humana. Extensas áreas transformadas por actividades forestales, agrícolas y ganaderas pueden ser restauradas mediante plantación y establecimiento de especies autóctonas. Un importante desafío es cómo construir sistemas ecológicos con una composición de especies y una estructura capaces de tolerar las condiciones de sequía estacional y persistir frente a la variabilidad climática actual y a los extremos climáticos probables del futuro. Esta tarea requerirá amplios conocimientos de las respuestas de las especies a condiciones físicas y el desarrollo de modelos de productividad basados en escenarios de cambio climático.





Nieblas en las zonas semiáridas del norte de Chile, donde constituyen el principal aporte hídrico en estos ecosistemas. Foto Daniel Stanton



Pradera de herbáceas anuales o efímeras con una intensa floración en años lluviosos en zonas áridas de Chile.
Foto Fernando Maldonado

5. Mecanismos de variabilidad

La oscilación climática del sur o El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés) tiene efectos en muchos de los ecosistemas del mundo, causando fluctuaciones climáticas con profundas consecuencias para el funcionamiento de los ecosistemas marinos y terrestres¹⁹. El fenómeno ENSO causa dramáticos cambios en las precipitaciones, asociados a sequías o lluvias torrenciales dependiendo de la región del mundo que se considere. En el caso de los ecosistemas mediterráneos de Chile y California los efectos de ENSO se traducen en uno o dos años seguidos que son dos o tres veces más lluviosos que la media, seguidos por períodos de varios años normales o secos. La periodicidad de los años húmedos varía de 3 a 6 años. Los modelos climáticos sugieren que, como resultado del calentamiento global,

las fluctuaciones asociadas al fenómeno de ENSO pueden incrementarse, con una agudización de los pulsos de lluvia e intensificación de las sequías. Durante años lluviosos, en algunos ecosistemas semiáridos como los del centro-norte de Chile (25-30°S), se desarrolla una gruesa alfombra de plantas herbáceas efímeras, incluyendo anuales y **geófitas**. La cobertura de herbáceas es heterogénea y puede alcanzar el 100%, con una profusa y colorida floración, en tanto que en los años secos la cobertura herbácea puede estar completamente ausente. En los años húmedos las especies efímeras producen una abundante cantidad de semillas que permanecen latentes en el suelo hasta el próximo evento de lluvia, o pueden persistir en forma de bulbos enterrados. El desarrollo de esta cobertura efímera depende de que la lluvia supere ciertos umbrales que disparan la germinación. Por este motivo, reducciones importantes de

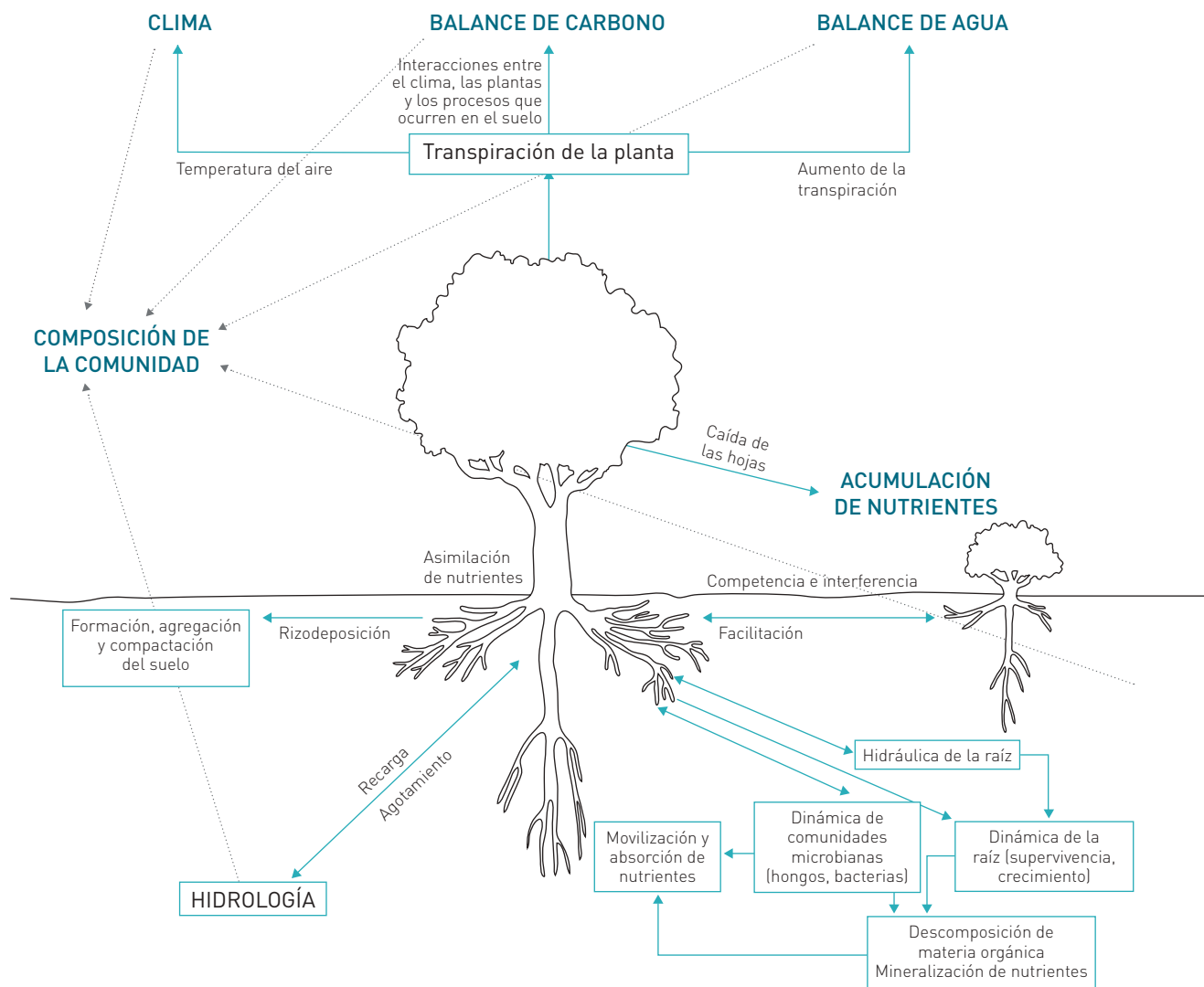


Diagrama de la compleja interacción entre el clima, la comunidad vegetal y los procesos que ocurren en el suelo

las lluvias como consecuencia de cambio climático podrían causar grandes pérdidas de diversidad y productividad en estos sistemas estacionales, que podrían llegar a desaparecer de las zonas donde los episodios de lluvia sean menos frecuentes. La pérdida de esta cobertura estacional desencadena cambios en la cadena trófica de organismos descomponedores, herbívoros y polinizadores asociados.

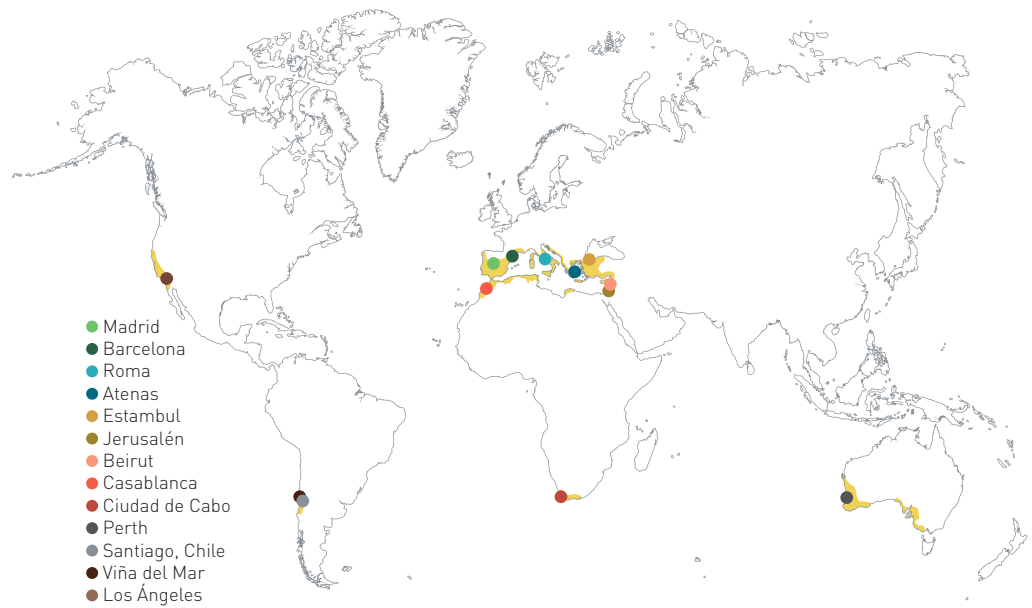
Al contrario que el incremento de CO₂, que ocurre de una manera bastante uniforme en toda la geografía terrestre, la intensidad del cambio de clima depende fuertemente de las condiciones locales, de variaciones topográficas, la cercanía al océano y la dirección de los vientos predominantes. Es decir, no todos los hábitats estarán sujetos a las mismas presiones y cambios ambientales. Por ejemplo, en la mayoría de los ecosistemas mediterráneos (excepto Sudamérica)

el calentamiento ya se está notando y las precipitaciones han disminuido en promedio un 20% durante el siglo XX. Pero hay mucha variación entre localidades ya que las precipitaciones tienen un marcado carácter local dependiente de la circulación atmosférica y del relieve, así como entre continentes. Por ejemplo, diversos informes (como los indicados por el IPCC) predicen para amplias zonas de la Península Ibérica un aumento de la precipitación invernal, con un aumento en la frecuencia de sucesos de alta intensidad (es decir, un aumento de la torrencialidad) junto a una disminución de las precipitaciones de primavera y otoño. En algunas regiones de Norte y Sudamérica ya se ha registrado un aumento notable de precipitación en los últimos 60 años. En contraste, en los mismos ecosistemas de Chile la disminución de la precipitación ha sido muy marcada durante el siglo XX. Las consecuencias ya se están

EL CLIMA MEDITERRÁNEO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO

Las zonas con clima mediterráneo tienen gran importancia para nuestro planeta, ya que concentran gran cantidad de especies en una superficie comparativamente pequeña. Por sus especiales características de clima y variedad de vida, las poblaciones humanas han elegido desde siempre estas zonas para asentarse, lo que ha conllevado consecuencias negativas para los ecosistemas, como alteraciones del ciclo del agua o la frecuencia de incendios forestales, lo que -sumado al calentamiento global- ha alterado el ciclo natural de regeneración de las especies.

CLIMA MEDITERRÁNEO



▶ LAS ZONAS DE CLIMA MEDITERRÁNEO REPRESENTAN **MENOS DEL 2%** DE LA **SUPERFICIE TERRESTRE**

▶ CONTIENE ENTRE **18% Y 20%** DE LA **BIODIVERSIDAD GLOBAL**

▶ SE CARACTERIZA POR **INVIERNOS SUAVES Y HÚMEDOS**, FAVORABLES PARA EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS, Y **VERANOS SECOS Y CÁLIDOS**, QUE SUPONEN 3-4 MESES DE INTENSA SEQUÍA

▶ LOS PERIODOS PROLONGADOS DE SEQUÍA, JUNTO A UNA ELEVADA BIOMASA VEGETAL, DAN LUGAR A **FRECUENTES INCENDIOS**

SISTEMAS DE ADAPTACIÓN EN PLANTAS MEDITERRÁNEAS

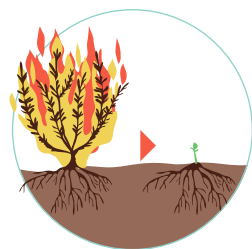


ESCLERÓFILAS
Arbustos con hojas duras y longevas que retienen nutrientes.



HOJAS PEQUEÑAS
Balance de energía y economía del agua.

▶ LAS ESPECIES MEDITERRÁNEAS TIENEN NOTABLES ADAPTACIONES PARA TOLERAR DISTINTOS FACTORES DE ESTRÉS



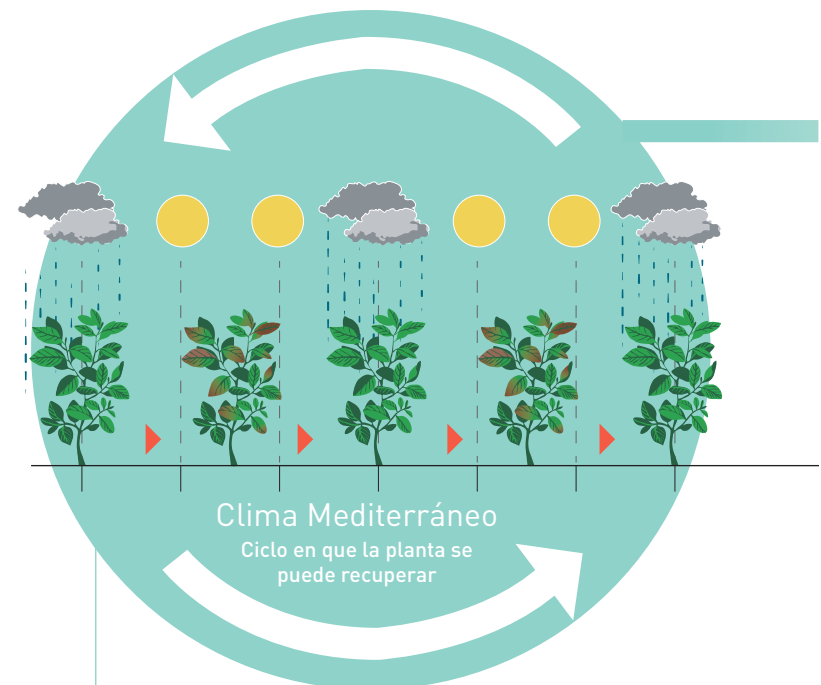
PIRÓFITAS
Planta que después de un incendio puede rebrotar a partir de su raíz o semilla.



SEROTINIA
Frutos que se abren dejando caer las semillas que germinan en respuesta al fuego o humo.



CADUCIFOLIOS DE VERANO
Pérdida total o parcial de su follaje en épocas secas.



La alternancia de estaciones favorables para el crecimiento de las plantas con otras de intensa sequía ha seleccionado especies adaptadas a condiciones ambientales tan contrapuestas. Las plantas resisten las condiciones de estrés derivadas de la sequía y se recuperan con las primeras lluvias de otoño.

PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN ZONAS DE TIPO MEDITERRÁNEO



ASENTAMIENTOS URBANOS CONCENTRADOS EN ZONAS MEDITERRÁNEAS

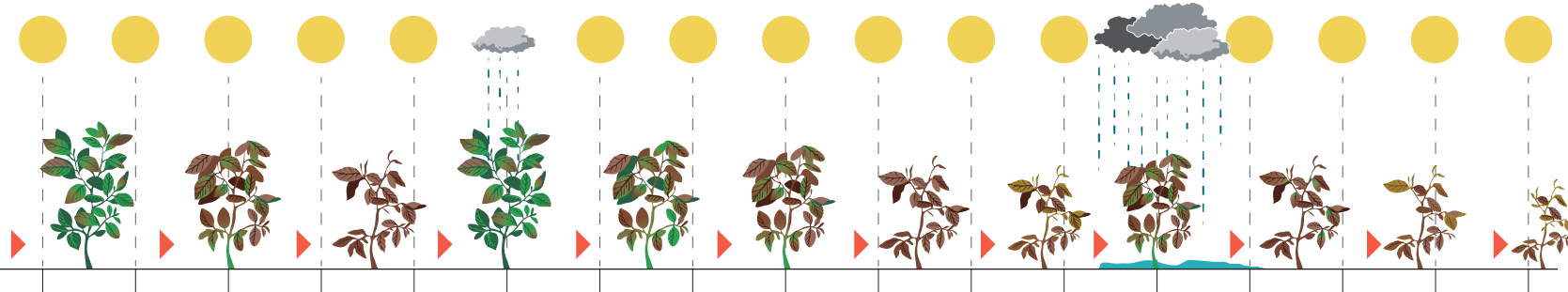
La creciente urbanización y los desarrollos turísticos, que afectan particularmente a zonas costeras, suponen con frecuencia una amenaza

para hábitats y especies de interés para la conservación. Esto, junto a los incesantes requerimientos de agua para la agricultura, suponen una gran exigencia

para los recursos hídricos, no siempre fáciles de conseguir. Los cada vez más limitados recursos hídricos van a constituir un tema central del debate social.

CLIMA MEDITERRÁNEO DESESTABILIZADO

Aumento de la temperatura por el cambio global



ESCASEZ DE LLUVIAS

Igualmente, la tendencia a una disminución de las precipitaciones totales, o a su redistribución estacional, afecta de forma importante a las comunidades vegetales mediterráneas.

PERIODOS DE VARIOS AÑOS CON ESCASA LLUVIA PUEDEN CAUSAR MORTALIDAD DE ESPECIES LEÑOSAS

PERIODOS LARGOS SIN LLUVIA

La tendencia a temporadas de sequía más extensas de lo habitual, consecuencia del calentamiento global, puede eliminar las especies menos resistentes, disminuyendo la diversidad y productividad de los ecosistemas.

BANCO DE SEMILLAS

Las semillas de plantas anuales forman bancos persistentes en el suelo durante la sequía y reponen la vegetación tras las primeras lluvias.



EVENTOS EXTREMOS DE LLUVIA

Otra tendencia desfavorable consecuencia del calentamiento de la atmósfera es el aumento de la torrencialidad, o fenómenos extremos de precipitación, que aumentarán la erosión y dificultarán la recarga de los acuíferos subterráneos. También se intensificarán fenómenos como El Niño o la denominada 'gota fría' en el Mediterráneo occidental.



Experimento de exclusión de lluvia en un bosque templado en la isla de Chiloé (Chile), donde la precipitación anual puede alcanzar los 3.000 litros por metro cuadrado. Foto Andrés Charrier

observando también en el Sureste de España. Por ejemplo, la vegetación de zonas áridas es muy resistente al cambio, pero su **resiliencia** es muy baja³. Es decir, la gran variabilidad interanual en las precipitaciones ha hecho a las plantas muy resistentes a los cambios, pero cuando éstos se producen no se vuelve al punto de partida.

Mientras que la menor disponibilidad de agua limitará, aún más y de forma general, la productividad de los ecosistemas mediterráneos, los cambios estacionales afectarán selectivamente a la dinámica de muchas especies (principalmente **perennes**) que podrían ser incapaces de adaptarse a unas nuevas condiciones más variables. Es el caso, por ejemplo, de *Retama sphaerocarpa*, una especie arbustiva ampliamente distribuida en los ecosistemas mediterráneos del sur de Europa cuya tasa de establecimiento depende de las precipitaciones de primavera¹²; si éstas disminuyen, como anticipan los modelos climáticos, su establecimiento se verá muy

reducido. Asimismo, la ‘otoñada’, como se conoce la germinación en otoño de muchas plantas, se verá también reducida, por lo que la continuidad de estas especies se puede ver amenazada y sus poblaciones en peligro en muchas áreas de su distribución, con riesgo de desaparecer a medio plazo. En Chile se ha documentado cómo la aceleración de los cambios climáticos (pulsos húmedos y secos) implica romper el ciclo regenerativo de algunas especies, lo que puede significar la extinción local de algunas plantas o el aumento en la susceptibilidad a la invasión por especies con menores umbrales de germinación¹³. A estos efectos habría que sumar los impactos de los abundantes herbívoros introducidos (como cabras y conejos en Chile central) sobre la regeneración en muchas localidades y la mayor frecuencia de incendios en años secos.

A este análisis de las respuestas futuras debe añadirse que la capacidad de las plantas y ecosistemas de recuperarse

de otras perturbaciones será diferente, especialmente en lo que se refiere al potencial adaptativo de ecosistemas con menor biodiversidad y pérdidas de especies. Los efectos de estos escenarios sobre los ciclos del agua, y de otros como los del carbono o del nitrógeno, pueden fácilmente traducirse en cambios en la composición de las comunidades vegetales, donde se sustituirán especies con requerimientos restringidos y alto consumo de nutrientes por especies que ocupen un rango más amplio de hábitats y menores requerimientos de nutrientes, junto a un aumento de las especies más tolerantes a la sequía (como las suculentas) y capaces de rebrotar después de un incendio. Todos estos cambios tendrán efectos difíciles de precisar actualmente, pero van a involucrar una reorganización de las comunidades vegetales y el desarrollo de ecosistemas noveles como consecuencia de la actividad humana.

6. Otras fuentes de agua

Las precipitaciones no son la única forma de acceso de las plantas al agua. Por ejemplo, en la zona norte semiárida de Chile, y en las cimas de algunos cerros costeros de Chile central, donde la precipitación anual (200 mm) es insuficiente para mantener vegetación arbórea, se encuentran sorprendentes manchas de bosques húmedos con un dosel que alcanza 20-24 m de alto y abundante presencia de musgos y helechos sobre los troncos y en el suelo, denotando condiciones más húmedas que las que explica la lluvia por sí sola. Muchas de las especies de árboles, enredaderas, helechos y hierbas en estas manchas de bosque se encuentran de forma habitual en los bosques templados del sur de Chile; es decir, a unos 1000 km de distancia. En las zonas áridas, estas manchas de bosque húmedo se mantienen gracias a un constante aporte de nieblas de origen oceánico, que suponen unos 400 mm de lluvia adicionales sobre el total anual. La constancia del aporte de niebla a lo largo del año, especialmente en la estación seca, y la nubosidad asociada a una baja temperatura (5 a 10°C menos que fuera de la zona de niebla), junto a la limitada pérdida de agua por **evapotranspiración**, explican la persistencia

y estabilidad de estos bosques húmedos fuera de su rango normal de distribución. Los árboles en estos bosques dependen completamente del aporte de la neblina para crecer y regenerar a partir de semillas¹⁴⁻¹⁶. La edad de los árboles y sus patrones de crecimiento y reclutamiento poblacional sugieren que los aportes de niebla oceánica han sido permanentes al menos durante los últimos 200 años. Sin embargo, modelos del fenómeno El Niño, sugieren que la frecuencia de la niebla puede reducirse en el futuro cercano y esto se traduciría en una mortalidad de árboles. La principal causa de mortalidad sería el deficiente funcionamiento del transporte de agua en la planta bajo condiciones de sequía aguda.

Para entender la respuesta de los ecosistemas a las reducciones de precipitación que anuncian los modelos climáticos, se están realizando experimentos que simulan distintos niveles de desecación mediante el uso de estructuras que extraen agua de lluvia. Por ejemplo, en latitudes templadas del sur de Sudamérica (35-45°S) se espera una disminución de las precipitaciones de verano de hasta el 50% hacia 2100. En un bosque en la Estación Biológica Senda Darwin en la isla de Chiloé (42°S) se han establecido parcelas experimentales que albergan árboles de hasta 25 m de alto dominados por *Nothofagus nitida* y *Drimys winteri*. Sus troncos recubiertos de epífitas, helechos, musgos y plantas trepadoras denotan la elevada precipitación anual en este sistema. Aquí se han establecido parcelas en las que el agua de lluvia es transportada fuera a través de canaletas plásticas. En estas parcelas se ha podido constatar, durante los primeros cinco años, diferencias en crecimiento de las especies de árboles a la reducción de la humedad, además de aumentos en la caída de hojarasca, cambios en las tasas de descomposición del mantillo, y una reducción de la cantidad de hojas en la copa. Estos resultados iniciales permiten esperar cambios importantes en el comportamiento del ecosistema.

Con el mismo objetivo, en una zona árida de la provincia de Almería, España, se instalaron en 2005 sistemas de exclusión de lluvia que incluyen tanto una disminución de la precipitación actual del 30% como una redistribución de las precipitaciones, aumentando un 30% en invierno





La Patagonia representa uno de los biomas más extensos y prístinos de Iberoamérica y es uno de los reservorios de agua dulce más grandes del planeta. El derretimiento glacial producto del cambio climático ya está causando serios trastornos en los ecosistemas terrestres y marinos. Foto Creative Commons CC0

y disminuyendo un 15% en otoño y primavera, en consonancia con las predicciones de los modelos regionales de clima. Los resultados hasta la fecha muestran tendencias a la pérdida de materia orgánica y nutrientes del suelo, así como efectos sobre las micorrizas.

7. Efectos de cambios en la disponibilidad de agua sobre el ciclo del carbono

Un reto actual es entender cómo la acumulación de CO₂ en la atmósfera afectará al ciclo del carbono y a la capacidad de los sistemas naturales de actuar como sumideros de CO₂ para mitigar los efectos sobre el clima. A pesar de que los ecosistemas mediterráneos ocupan una parte relativamente pequeña de la cubierta forestal mundial, presentan características específicas que los hacen un modelo adecuado para estudiar los efectos del cambio climático en ecosistemas terrestres, particularmente respecto a la limitada disponibilidad de agua.

El proceso de desertificación y el ciclo del carbono están interconectados. Por una parte, la erosión y degradación del suelo, junto a la sequía, tienen un importante efecto sobre la fijación de carbono por parte de la vegetación y su incorporación al suelo. Por otro lado, la temperatura, la humedad y la identidad de las especies que integran la comunidad vegetal controlan la descomposición de materia orgánica en el suelo. Las plantas aportan materia orgánica en forma de hojarasca y otros detritos (ramas, flores, frutos) y liberan también a través de la raíz una gran cantidad de compuestos orgánicos que pueden suponer hasta el 40% del CO₂ fijado en la fotosíntesis. Dado que la respiración del suelo (descomposición) depende de la temperatura, se puede anticipar que el aumento de la temperatura global incrementará el flujo de CO₂ del suelo a la atmósfera, lo que agravaría aún más el problema (ver Capítulo 6). Sin embargo, en el caso de los ecosistemas mediterráneos la humedad del suelo puede jugar un papel muy importante modulando esta respuesta, dado que también se predice un descenso en las precipitaciones en ciertas áreas (por ejemplo, en el sur de Europa). La

liberación de CO₂ a la atmósfera durante las épocas de sequía es escasa, pero se producen importantes picos tras eventos de lluvia que, globalmente, pueden suponer hasta el 60% del CO₂ total emitido por el suelo en zonas secas. Estos picos responden a la acumulación de compuestos lábiles de carbono en el suelo, que son rápidamente metabolizados cuando hay agua disponible y en función de la temperatura.

8. Efecto sobre las interacciones biológicas

Un aumento de temperatura y una mayor sequía van a influir en el crecimiento de las plantas, pudiendo afectar al balance de la interacción entre ellas y resultar en cambios estructurales de las comunidades vegetales. Las distintas especies que componen una comunidad vegetal, aun siendo muy parecidas, responden de forma diferente a los factores climáticos (ver Capítulos 5, 12 y 13). Como ya hemos comentado, cambios en la estacionalidad de las precipitaciones pueden afectar al establecimiento de unas especies mientras que incrementos en la temperatura pueden favorecer a otras. Particularmente sensibles al cambio climático son los procesos que ocurren en el suelo, ya que las variaciones de humedad y temperatura afectan directamente a sus comunidades bióticas, formadas por microorganismos (hongos, bacterias) y la microfauna del suelo. Todos ellos están frecuentemente implicados en el proceso de descomposición de materia orgánica, por lo que los cambios en el clima pueden modificar el reciclaje de algunos elementos y puede suponer cambios importantes en la disponibilidad de nutrientes, otorgando ventaja a ciertas especies y perjudicando a otras. De hecho, la distribución de la vegetación se explica bastante bien en función de la duración de la estación de crecimiento, la precipitación y la temperatura mínima, por lo que cualquier cambio en estos factores repercutirá en cambios de la distribución de la vegetación tal como la conocemos hoy día.

Los cambios, tanto en recursos como en factores ambientales, como consecuencia del **cambio global**

van a influir necesariamente en la interacción entre las distintas especies de plantas, como ya se ha mencionado. Lo común en la naturaleza son combinaciones complejas de interacciones de competencia y facilitación, donde la intensidad de cada una de ellas cambia dependiendo de la disponibilidad de recursos, de forma que la interacción entre dos especies depende de las condiciones abióticas¹⁷. Aunque no se trata de algo fijo sino dinámico; así, por ejemplo, la competencia por la luz aumenta a medida que es más productivo un sistema, ya que las plantas crecen más y se pueden ensombrecer unas a otras. Estudios no experimentales indican también que los efectos competitivos son más intensos en años húmedos y frescos y los facilitadores en años más secos y calurosos, afectando la frecuencia con que podemos encontrar a las distintas especies, lo que a largo plazo puede llevar, una vez más, a cambios en la estructura de las comunidades vegetales.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 IPCC. Fifth Assessment Report. Cambridge University Press (2014).
- 2 Peñuelas, J. & Filella, I. Responses to a warming world. *Science* 294, 793–795 (2001).
- 3 Miranda, J.D. *et al.* Climatic change and rainfall patterns: effects on semiarid plant communities of the Iberian Southeast. *Journal of Arid Environments* 75, 1302–1309 (2011).
- 4 Pugnaire, F.I. *et al.* Facilitación de las especies almohadilladas y cambio global en las comunidades alpinas del Parque Nacional de Sierra Nevada. En *Proyectos de investigación en Parques Nacionales: 2010–2013* (P. Amengual y B. Asensio, eds.), pp. 91–104, Ed. OAPN, Madrid (2015).
- 5 Martínez-García L.B., Miranda, J.D. & Pugnaire, F.I. Impacts of changing rainfall patterns on mycorrhizal status of a shrub from arid environments. *European Journal of Soil Biology* 50, 64–67 (2012).
- 6 Cowling, R.M. *et al.* Plant diversity in mediterranean-climate regions. *Trends in Ecology and Evolution* 11, 362–366 (1996).
- 7 Mittermeier R.A. *et al.* Hotspots: Earth's Richest and Most Endangered Terrestrial Ecoregions. Mexico City. CEMEX (2000).
- 8 Sala, O.E. *et al.* Global biodiversity scenarios for the Year 2100. *Science* 287, 1770–1774. (2000).
- 9 MEA. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC. Island Press (2005).
- 10 Klausmeyer K.R. & M.R. Shaw. Climate Change, Habitat Loss, Protected Areas and the Climate Adaptation Potential of Species in Mediterranean Ecosystems Worldwide. *PLoS ONE* 4, e6392. (2009)
- 11 Maestre F. *et al.* Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. *Science* 335, 214–218 (2012).

- 12 Pugnaire, F. I. *et al.*. Colonization processes in semi-arid Mediterranean old-fields. *Journal of Arid Environments* 65, 591–603 (2006).
- 13 Jiménez, M. A. *et al.* Extreme climatic events change the dynamics and invasibility of semi-arid annual plant communities. *Ecology Letters* 14, 1227–1235 (2011).
- 14 Del-Val, E. *et al.* Rain forest islands in the Chilean semiarid region: fog-dependency, ecosystem persistence and tree regeneration. *Ecosystems*, 9, 598–608 (2006).
- 15 Gutiérrez, A.G. *et al.* Regeneration patterns and persistence of the fog-dependent Fray Jorge forest in semiarid Chile during the past two centuries. *Global Change Biology* 14, 161–176 (2008).
- 16 Macek, P. *et al.* Shrub facilitation drives tree establishment in a semiarid fog-dependent ecosystem. *Applied Vegetation Science* 21, 113–120 (2018).
- 17 Pugnaire, F.I. & Luque, M.T. Changes in plant interactions along a gradient of environmental stress. *Oikos* 93, 42–49 (2001).
- 18 Prieto, I., Armas, C. & Pugnaire, F.I. Water release through plant roots: new insights on its consequences at the plant and ecosystem level. *New Phytologist* 193, 830–841 (2012).
- 19 Holmgren, M. *et al.* Extreme climatic events shape arid and semiarid ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4, 87–95 (2006).

REFERENCIAS COMENTADAS

Milena Holmgren, Marten Scheffer, Exequiel Ezcurra, Julio R. Gutiérrez y Godefridus M.J. Mohren. 2001. El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution* 16, 89-94.

Estudios recientes muestran las importantes implicaciones que, para el funcionamiento de ecosistemas, tiene la oscilación austral El Niño. Sus efectos abarcan todo tipo de sistemas, desde desiertos hasta bosques lluviosos tropicales. Los pulsos inducidos por El Niño sobre la productividad de las plantas pueden causar grandes cambios en la cadena trófica de organismos descomponedores, herbívoros y polinizadores asociados, desencadenando importantes pérdidas de productividad y biodiversidad de los ecosistemas. Nuestra creciente capacidad para predecir los efectos de El Niño se puede utilizar para mejorar las estrategias de prevención y para la restauración de ecosistemas degradados.

Iván Prieto, Cristina Armas, Francisco I. Pugnaire. 2012. Water release through plant roots: new insights on its consequences at the plant and ecosystem level. *New Phytologist* 193, 830-841.

En los últimos años se ha descubierto una nueva estrategia de ciertas plantas para tolerar la sequía: la redistribución hidráulica, un proceso que juega un papel decisivo en el balance hídrico no sólo de la planta implicada, sino de comunidades y ecosistemas enteros. Este proceso, descrito por primera vez en Utah, EEUU, en 1987, consiste en el movimiento pasivo de agua desde capas de suelo húmedas a secas a través de las raíces sin suponer un gasto energético para la planta. El ascenso de agua se produce por un proceso físico de diferencias de humedad entre diferentes capas del suelo, y tiene lugar cuando los estomas están cerrados por lo que, en la mayoría de las especies en que se ha detectado redistribución hidráulica, ésta ocurre durante la noche. La excepción la encontramos en

especies con metabolismo CAM, como cactus y otras plantas crasas, que mantienen sus estomas cerrados durante el día, que es cuando redistribuyen el agua. En algunos bosques amazónicos el aumento del consumo de agua y la mayor transpiración de especies que acceden a capas profundas y realizan elevación hidráulica es capaz de disminuir la temperatura local del aire entre 2 y 3°C.

Ben Bond-Lamberty and Allison Thomson. 2010. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. Nature 464, 579–582.

Los suelos son sistemas vivos habitados por una miríada de seres, en su mayoría microscópicos. Se estima que 1 g de suelo contiene hasta 1000 millones de bacterias pertenecientes a decenas de miles de taxones; hasta 200 millones de hongos y una enorme variedad de nematodos, lombrices, ácaros y otros artrópodos. Todos ellos, junto a las raíces de las plantas, emiten CO₂ al suelo como consecuencia de su actividad metabólica. La emisión total de CO₂ del conjunto es lo que se denomina respiración del suelo, y se puede medir mediante analizadores de gases que usan rayos infrarrojos. Cuantificar la respiración del suelo es importante para estimar el balance de carbono y CO₂ en un ecosistema. En este artículo, combinando observaciones globales de respiración del suelo y datos climáticos de alta resolución, los autores encontraron que la respiración global aumentó en 100 millones de toneladas de C cada año entre 1989 y 2008. Estos datos son consistentes con una aceleración del ciclo del carbono terrestre en respuesta al cambio climático global.

GLOSARIO

Cambio global. Se denomina así al conjunto de cambios ambientales derivados de la actividad humana en el planeta, e incluye el cambio climático, alteración en la distribución de especies, y a cambios en los procesos que determinan el funcionamiento de los ecosistemas.

Dosel (arbóreo). Hábitat que comprende la región de las copas y parte altas de los árboles de un bosque. Especialmente en las selvas, el dosel arbóreo alberga una flora y una fauna única y especializada, que no se puede encontrar en ninguna otra capa del bosque.

Evapotranspiración. Cantidad de agua del suelo que vuelve a la atmósfera como consecuencia de la evaporación desde las superficies foliares y de la transpiración de las plantas.

Geófitas. Son especies vegetales que subsisten a la estación desfavorable mediante órganos de resistencia subterráneos, que pueden ser bulbos, rizomas, tubérculos o raíces engrosadas que almacenan agua.

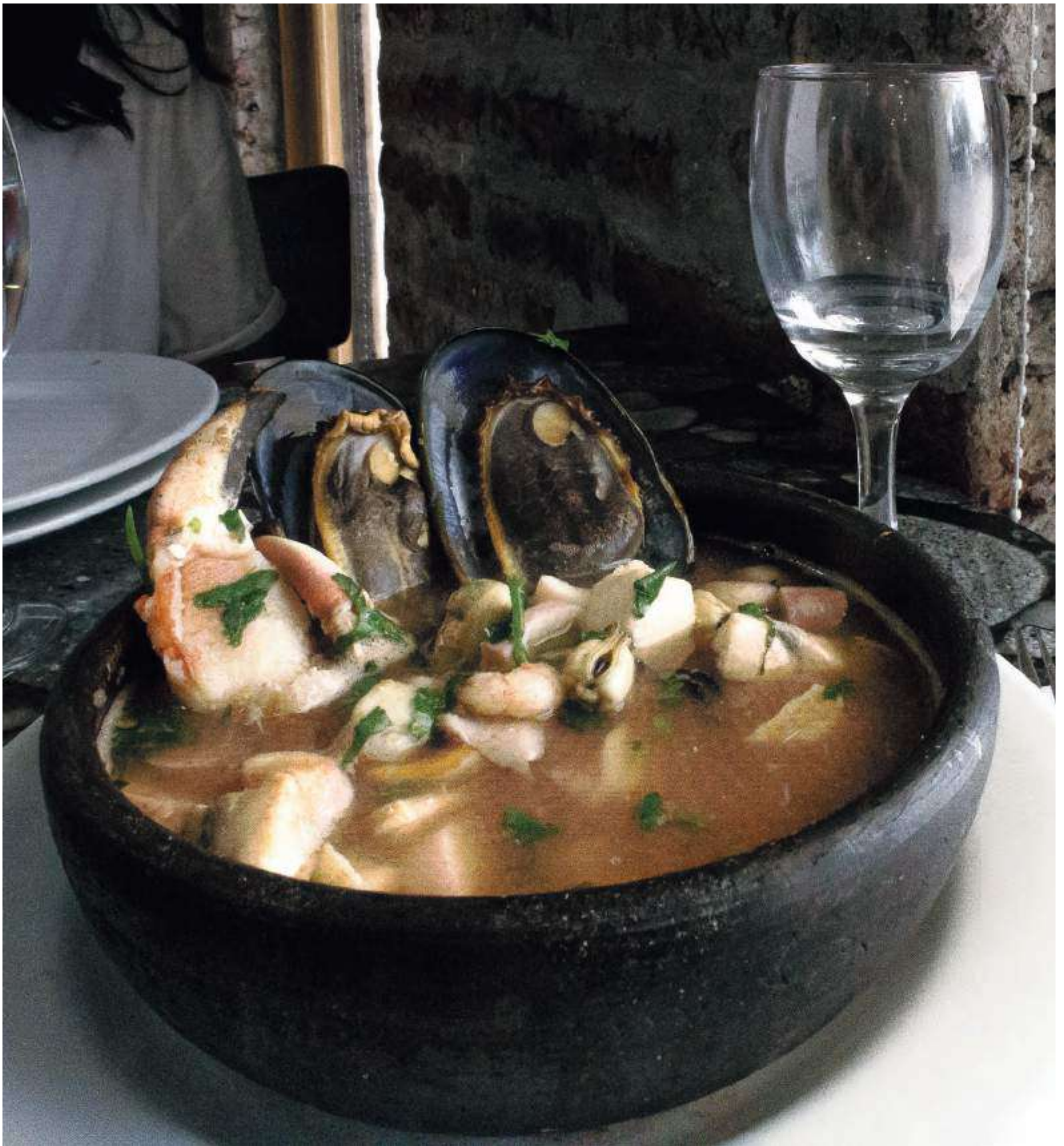
Perenne. Plantas que viven más de una temporada. Las especies de hoja perenne son aquellas que no pierden la hoja al llegar la temporada desfavorable, por lo que mantienen el follaje de forma continuada. Las hojas se van renovando de forma continua.

Taxones. Un taxon, o taxón, es un grupo de organismos relacionados entre sí que comparten una serie de atributos y que forman grupo diferenciado. Cada taxón se encuentra dentro de un nivel jerárquico determinado, que va desde el nivel de especie o subespecie hasta Género, Familia, etc.

Resiliencia. Es la capacidad de volver a la situación original después de una perturbación.

Manglar, costa de Panama. Los manglares son muy importante en los ecosistemas costeros tropicales. Por una lado representan zonas de reclutamiento de peces y por otra proveen protección ante tormentas y tsunamis. Son muy sensibles a las actividades humanas en los ecosistemas terrestres aledaños, como el uso excesivo de fertilizantes, el vertido de compuestos tóxicos y el aporte de sedimentos producto de erosión asociada a sobrepastoreo o cambio en el uso de la tierra. Foto Pablo A. Marquet





Cambio global y el futuro de las pesquerías

Cristina Ruano-Chamorro, Veronica Ortiz, Juan Carlos Castilla, Sergio A. Navarrete y Stefan Gelcich

RESUMEN

La pesca desempeña funciones fundamentales en el suministro de alimentos a la humanidad, en la seguridad alimentaria y en la generación de ingresos. Según las proyecciones, los cambios globales repercutirán importantemente en los ecosistemas marinos, afectando las comunidades y las economías costeras. Existen abundantes y diferentes factores de cambio global que influyen sobre los océanos y, por supuesto, la extracción de recursos del mar es en sí mismo un agente de cambio global. En este capítulo se revisan estresores y desafíos claves de cambio global que son relevantes para la actividad pesquera. Comenzamos haciendo hincapié en alteraciones físico-químicas como el aumento de la temperatura y la acidificación del océano y sus repercusiones en los recursos marinos de importancia comercial, para posteriormente focalizarnos en aspectos relacionados con las dimensiones humanas de cambio global que afectan a las pesquerías, como lo son la sobreexplotación y las fuerzas de mercado. Finalizamos estableciendo la importancia de comprender la vulnerabilidad de comunidades costeras frente a diferentes estresores de cambio global como una forma de potenciar esfuerzos de adaptación de individuos y comunidades para enfrentar los problemas que se advierten en el ámbito de la pesca.

Caldillo. Foto Felipe Torres

Introducción

¿Te has preguntado que tiene que ver el aumento de la temperatura en el planeta, la emisión de CO₂ a la atmósfera o el incremento del consumo de productos marinos en China, Chile o España, con el futuro de las pesquerías mundiales? Las dinámicas del océano que sustentan las pesquerías y sus mercados están íntimamente vinculados a fenómenos de cambios globales, que pueden afectar directamente lo que se encontrará en tu “mariscal de turno” de algunos años más.

La pesca desempeña funciones fundamentales en el suministro de alimentos a la humanidad, en la seguridad alimentaria y en la generación de ingresos. Unos 43,5 millones de personas trabajan directamente en el sector pesquero y la gran mayoría de ellas viven en países en vías de desarrollo. Sumando a esta cifra la de quienes intervienen en las industrias afines de elaboración, comercialización, distribución y suministro, el sector sostiene la economía de cerca de 200 millones de personas; de las cuales aproximadamente unos 50 millones son pescadores artesanales o de pequeña escala¹. Según las proyecciones, los cambios globales repercutirán de manera importante sobre los ecosistemas marinos, afectando las comunidades y las economías costeras. La pesca presenta rasgos propios en lo que respecta a la extracción de los recursos y a sus nexos con los procesos ecosistémicos. En este sentido, incorporar la vulnerabilidad, adaptación y mitigación frente al cambio global en modelos

de gobernanza que aseguren la disponibilidad y acceso a los recursos pesqueros, se está convirtiendo en uno de los desafíos más críticos en los océanos.

Unos 43,5 millones de personas trabajan directamente en el sector pesquero en el mundo y la gran mayoría de ellas viven en países en vías de desarrollo

Existen abundantes y diferentes factores de cambio global que influyen sobre los océanos y, por supuesto, la extracción de recursos del mar es en sí mismo un agente de cambio global. En este capítulo se revisan estresores y desafíos claves de cambio global que son relevantes para la actividad pesquera. Comenzamos haciendo hincapié en alteraciones físico-químicas como el aumento de la temperatura y la acidificación del océano y sus repercusiones en los recursos marinos de importancia comercial, para posteriormente focalizarnos en aspectos relacionados con las dimensiones humanas de cambio global que afectan a las pesquerías, como lo son la sobreexplotación y las fuerzas de mercado. Finalizamos estableciendo la importancia de comprender la vulnerabilidad de comunidades costeras frente a diferentes estresores de cambio global como una forma de informar esfuerzos de adaptación de individuos y comunidades para enfrentar los problemas que se advierten en el ámbito de la pesca.

1. Efectos de estresores de cambio global sobre pesquerías

1.1 Aumento de Temperatura

A escala global la temperatura del mar está aumentando a una tasa mayor a la nunca antes registrada en el planeta; esta tasa es de aproximadamente 0,2°C por década para los últimos 30 años². Los expertos estiman que alrededor del 90% del incremento de calor en el planeta, lejos de permanecer exclusivamente en la atmósfera, ha sido

absorbido en su gran mayoría por el océano. Este calor ha generado un aumento de la temperatura especialmente en la capa superficial del mar, que ha aumentado 0.11°C por década entre 1971 y 2010³. Esta variación se atribuye a la influencia de la actividad humana en el sistema climático y los modelos predicen que continuará en el futuro. Tal como ocurre en tierra, la temperatura modula todos los procesos físico-químicos y biológicos, de manera que el incremento de la temperatura del océano produce efectos directos e indirectos sobre los ecosistemas marinos, las comunidades biológicas que los habitan y en consecuencia, sobre las pesquerías.

Los efectos directos son aquellos que influyen sobre la fisiología, comportamiento, crecimiento, reproducción, mortalidad y distribución geográfica y batimétrica de las especies. Los organismos pueden adaptarse a los cambios de temperatura dentro de ciertos rangos, pero fuera de estos valores críticos, las posibilidades de adaptación son muy pocas. Dadas las tasas de cambio predichas para los próximos 100 años, será muy difícil que los organismos puedan adaptarse a ello, por lo que se espera que el crecimiento y la reproducción de muchas especies se vean afectadas positiva o negativamente, produciendo en muchas de ellas aumento de la mortalidad y una disminución de la población⁴.

El calentamiento del océano ha generado un cambio en la distribución de algunas especies que se desplazan en busca de un rango óptimo o al menos tolerable de temperatura^{5,6}. Por ejemplo, en el Mar del Norte la distribución de dos tercios de los peces de interés comercial cambiaron de latitud o de profundidad debido al aumento de temperatura^{5,6}. A nivel global la composición de las pesquerías en zonas templadas, subtropicales y tropicales ha cambiado hacia especies con preferencias a altas temperaturas⁷, lo que se ha denominado la “tropicalización” de las pesquerías⁸. Así, especies de latitudes más bajas (ej. tropicales) tienden a aumentar su abundancia en latitudes más altas (ej. subtropicales), y en las latitudes bajas (ej. tropicales) disminuye la abundancia de especies que son típicas de latitudes altas (ej. subtropicales). Puesto que el margen para una mayor tropicalización en las zonas

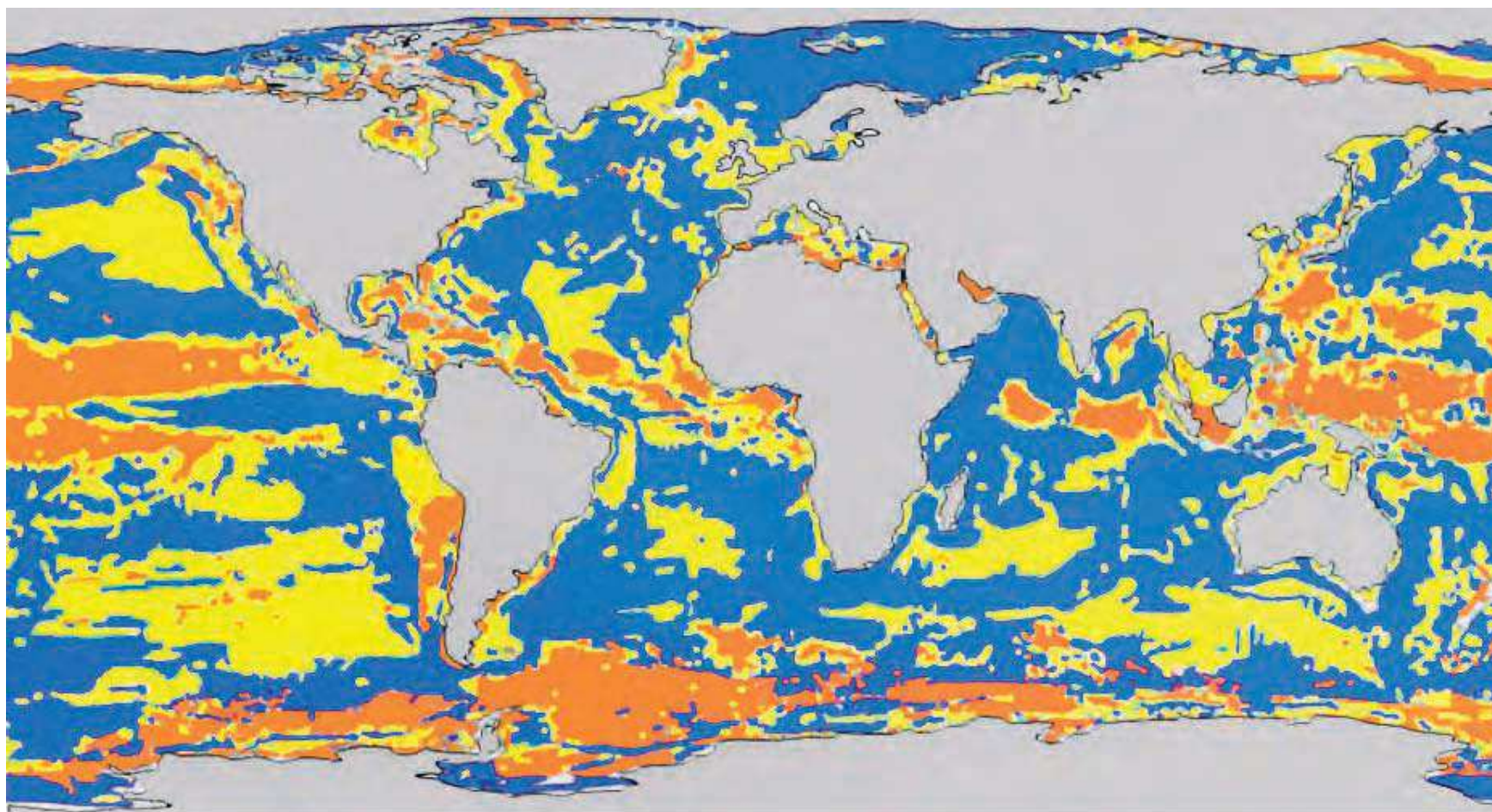


Figura 1. Cambio potencial de pesca (en porcentaje) asociado a cambios de distribución de especies objetivo producto del cambio climático. Modificado de Cheung et al. (2010)¹¹. El color azul se asocia a un aumento en el potencial de pesca de 16 a > 100%, amarillo a un cambio de -16 a 15% y el color anaranjado se asocia a una reducción de entre -50 a -15 %

tropicales es muy limitado, se espera que allí el efecto del calentamiento global sea generalizadamente negativo. Hacia latitudes más altas los efectos dependerán, entre otros factores, de la capacidad de migración de las especies desde las zonas templadas hacia los trópicos y de su valor comercial. Revisiones recientes de los datos de pesquerías globales sugieren que esta migración ya está ocurriendo en muchas regiones del mundo.

En un futuro, se estima que la distribución de las especies de peces e invertebrados seguirá la misma tendencia como respuesta al calentamiento del océano^{9,10}. Este cambio en la distribución de especies a escala regional o incluso global no respeta los límites políticos de los países, y generará un cambio en la distribución de capturas y esfuerzos pesqueros¹¹. En la Figura 1 se muestra el cambio potencial en la

pesca producido por los cambios de distribuciones de especies para los diferentes océanos del mundo. Estas predicciones gruesas de cambios en pesquerías deben por supuesto interpretarse con mucha cautela. Los modelos actuales para realizar estas predicciones, como los 'modelos dinámicos bioclimáticos en sobre', presentan grandes niveles de incertidumbre¹² que se adiciona a la incertidumbre inherente de las predicciones de modelos climáticos. Además, estos modelos deben realizar muchas simplificaciones respecto de los múltiples factores ambientales y ecológicos que afectan la distribución geográfica de especies. Un área de mucha actividad científica es el perfeccionamiento de estos modelos. A pesar de estas limitaciones, los modelos actuales aportan información general sobre cómo podrán comportarse las pesquerías en los océanos alterados por el aumento de temperatura.

El calentamiento del océano ha generado cambios en la distribución geográfica de algunas especies que se desplazan en busca de temperaturas más favorables

Por otro lado, los efectos indirectos del aumento de la temperatura del océano sobre las pesquerías son aquellos que afectan a la productividad, estructura y composición de los ecosistemas marinos, los cuales son vitales para la alimentación, el refugio y la reproducción de los recursos pesqueros^{13,14}. Un ejemplo se observa en la degradación de los organismos que forman hábitat para especies que representan recursos pesqueros y también para otras especies. Un ejemplo de éstos son los arrecifes de coral o los bosques de algas. El aumento de temperatura genera estrés en los corales y éstos pueden llegar a perder las microalgas simbiotas que viven en su interior. Los corales, al perder esas microalgas, pierden también la capacidad fotosintética, sufren blanqueamiento y finalmente pueden llegar a morir. Eventos extremos de temperatura provocan el blanqueamiento masivo de los corales, los cuales pueden alcanzar una escala mayor de 100 km¹⁵. La recuperación tras esta muerte masiva es parcial y la ocurrencia de varios eventos de temperaturas extremas pueden llegar a ser devastadores. Por ejemplo, si la temperatura del mar sigue aumentando según lo previsto, se estima que los corales del Caribe pueden colapsar antes de que finalice el siglo 21¹⁶. Su degradación supondría el declive de las pesquerías de las que dependen miles de comunidades costeras^{17,18,19}. La pérdida del 50% de los arrecifes de coral del Caribe podría suponer una pérdida anual de 195-319 millones de dólares en las pesquerías.

Los bosques de macroalgas también están siendo afectados por el aumento de temperatura²⁰, aunque al parecer las tendencias no son homogéneas a través del todo el mundo. En las costas del norte de España se ha observado una disminución drástica de varias especies de macroalgas, que ha sido atribuida al calentamiento superficial del agua. Estas macroalgas, que antes formaban densos bosques submarinos, ahora sólo se encuentran formando pequeños parches en algunas

zonas de la costa norte de España donde la temperatura se mantiene más fría²¹. La pérdida de estos bosques de macroalgas supone la pérdida de hábitat, el cambio en la estructura de las comunidades marinas y un impacto para la pesca asociada a estos ecosistemas.

El calentamiento global también está asociado a la disminución de la concentración de oxígeno en el océano²². Este fenómeno reduce la disponibilidad de oxígeno para los organismos marinos, lo cual tiene efectos negativos sobre los procesos biológicos, como el crecimiento, el metabolismo o la alimentación²³. Se estima que el peso corporal de peces e invertebrados disminuirá entre un 14-24% a nivel global entre los años 2000-2050 como consecuencia del calentamiento y disminución de oxígeno en el océano²⁴. Esta disminución del tamaño de los organismos será mucho mayor en latitudes tropicales e intermedias. Se estima que en el futuro la concentración de oxígeno seguirá disminuyendo y se extenderá a otras zonas del océano²⁵.

Asociado al calentamiento global también se predicen cambios importantes en los regímenes de vientos, especialmente aquellos que se relacionan con el gradiente de temperatura tierra-océano en los márgenes de los continentes^{26,27}. Para la mayoría de las costas del mundo los modelos climáticos-oceanográficos regionales predicen un aumento en la intensidad o en la prevalencia de vientos favorables al afloramiento o surgencia de aguas subsuperficiales ricas en nutrientes, producto del aumento del diferencial de temperatura tierra-océano²⁸. Este cambio en la estacionalidad de los vientos que favorecen la surgencia sin dudas tendrá impacto en la productividad primaria²⁸ y en los patrones de circulación en el océano costero, lo que puede afectar los patrones de dispersión larval de muchas especies de invertebrados, incluyendo aquellos sujetos a explotación²⁹.

1.2 Acidificación

Como resultado del uso de combustibles fósiles y la deforestación, la concentración actual de CO₂ en la atmósfera es la mayor experimentada en 800.000 años y



Comercialización de algas e invertebrados, mercado de Ancud, Chile. Foto Pablo A. Marquet

probablemente la mayor en los últimos dos millones de años. La concentración de este gas de efecto invernadero en la atmósfera sería mucho mayor si no fuera por el océano, el cual absorbe un tercio del CO_2 producido por los humanos³⁰. Aproximadamente el 50% del CO_2 que entre 1800 y 1994 ha sido liberado por efecto de las actividades humanas ha quedado almacenado en los océanos³¹, y cerca del 30% de las emisiones modernas de CO_2 son actualmente absorbidas por océanos³². El pH global de la capa superficial del océano ya ha disminuido desde 8,2 registrado en la era pre-industrial a 8,1, lo cual corresponde a un aumento cercano al 30% en acidez del océano. Para el año 2100 se proyectan valores de pH entre 7,8 – 7,9, representando un aumento del doble en acidez. Además, los modelos indican que durante los próximos 100 años el pH de la capa superficial del océano seguirá acidificándose en 0,3 a 0,5 unidades³³.

Las repercusiones que sufrirán los organismos marinos y ecosistemas son todavía inciertas, porque los mecanismos que determinan su susceptibilidad a una exposición moderada y prolongada al CO_2 no son suficientemente conocidos. Sin embargo, se espera que debido a la reducción del pH los organismos que utilizan carbonato de calcio como parte de su estructura corporal (esqueletos, conchas), tales como corales, moluscos, algas calcáreas y varias especies de microorganismos marinos (foraminíferos, cocolitofóridos), sean los más sensibles a la acidificación de los océanos³⁴.

Estudios biológicos muestran que procesos biológicos como la calcificación, la supervivencia, el crecimiento y la reproducción de organismos marinos son afectados por la acidificación. Los peces, a pesar de ser capaces de regular el pH intracelular, también presentan susceptibilidad a la acidificación, sobre todo en estadios larvales y juveniles, durante el desarrollo de otolitos, la función mitocondrial, la tasa metabólica y el sistema sensorial³⁵. La sensibilidad de los organismos marinos a la acidificación es diferente entre especies. Las fases de desarrollo más tempranas (larvas y juveniles) suelen ser más vulnerables a los efectos de la acidificación, lo que puede tener un importante efecto negativo sobre el reclutamiento.

La acidificación también tiene un efecto negativo a nivel de ecosistema. Por ejemplo, las redes tróficas marinas también se verán afectadas como consecuencia del impacto en organismos calcificadores³⁶. Los microorganismos calcificadores y las larvas y juveniles forman un importante eslabón en la base de la red trófica, por lo que la disminución de su abundancia produciría desequilibrios en las relaciones entre depredadores y presas³⁷ y entre competidores. Potencialmente, estos desequilibrios pueden generar una reducción poblacional de los depredadores de interés comercial³⁸.

Las pesquerías y especialmente el cultivo de moluscos son importantes fuentes de proteínas e ingresos que se verán afectadas por la acidificación. En el caso de la pesca y acuicultura global de moluscos, el costo económico estimado de la acidificación sería de alrededor de 6 billones de dólares en 2100, asumiendo una demanda constante, mientras que podría ser de 100 billones de dólares si se considera un aumento de la demanda futura³⁹. Por ejemplo, en Chile los científicos han mostrado que la acidificación ya podría estar impactando especies que son estratégicas para la pesca y acuicultura, como mitílidos, gastrópodos y ostiones. Según pruebas efectuadas en laboratorio, al disminuir el pH natural del agua marina también descienden las tasas de crecimiento de estos organismos. Si se escalaran estos resultados, significa que en 30 años más la productividad de las especies comerciales de dichos grupos podría disminuir en alrededor de un 30%⁴⁰.

En el caso de la pesca y acuicultura global de moluscos, el costo económico estimado de la acidificación podría llegar a 6 billones de dólares en 2100, asumiendo una demanda constante, mientras que podría llegar a 100 billones de dólares si se considera un aumento de la demanda futura

Todavía existe incertidumbre sobre el efecto real que tendrá la acidificación en los organismos marinos, ecosistemas y finalmente en las pesquerías⁴¹. Hasta ahora,

la información existente del efecto de la acidificación sobre estos organismos está basada principalmente en estudios experimentales de laboratorio, y todavía existe poca evidencia sobre su efecto en el medio natural. Esta es un área de interés creciente para científicos de todo el mundo.

1.3 Sobreexplotación

Las repercusiones del cambio climático se ejercerán transversalmente en el contexto de los factores que impulsan hoy las pesquerías, de las tendencias que sigue el sector y de la situación actual de las pesquerías. La sobreexplotación es sin duda una de las causas principales del declive de las pesquerías mundiales⁴². Ésta es el resultado de un aprovechamiento desmesurado de los recursos hasta el punto en el que la velocidad de extracción es mayor a la velocidad de renovación de los mismos. Dicha práctica no sólo ha causado la disminución en la abundancia de las especies objetivo de la pesca, sino que también ha provocado cambios en la distribución de las especies, los tamaños de los individuos, la estructura y composición de los stocks (fracción explotable de una especie recurso), comunidades y ecosistemas marinos, así como la pérdida global de biodiversidad.

Según la FAO 2014 en el año 2013 el 31.5% de las pesquerías mundiales se encontraban **sobreexplotadas**; el 58.1% en **plena explotación** y el 10.5% **subexplotadas**⁴³. Estas estimaciones corresponden sólo al 25% de las pesquerías mundiales que son principalmente industriales y de países desarrollados⁴⁴. El resto de pesquerías, mayoritariamente de países en vías de desarrollo, no dispone de datos para ser evaluadas. El conocimiento sobre la dimensión de las capturas y sobre su estado de conservación es especialmente escaso en pesquerías artesanales, las que son espacialmente estructuradas y en las que participa un gran número de personas y organizaciones. Se estima que el 64% de las pesquerías no evaluadas están **sobreexplotadas** y el 18% colapsadas.

Los ecosistemas acuáticos han sido profundamente alterados por la pesca. A medida que las especies son **sobreexplotadas**,

es común observar que el esfuerzo pesquero se focaliza en especies cada vez de menor tamaño corporal y más abajo en la red trófica, generando un empobrecimiento de los ecosistemas^{45,46}. Existe mucha evidencia, en prácticamente todos los ecosistemas marinos del planeta, sobre las cascadas tróficas que generan las pesquerías al disminuir la abundancia de especies de alto nivel trófico⁴⁷. La pesca de arrastre también tiene efectos negativos importantes sobre ecosistemas bentónicos ya que a su paso causan perturbaciones físicas del hábitat muy importantes⁴⁸. Estos impactos sobre el hábitat y aquellos generados sobre las especies capturadas incidentalmente por las artes de pesca suponen pérdidas de biodiversidad acuática⁴⁹ que pueden repercutir en procesos ecológicos como la depredación⁵⁰, la bio-erosión⁵¹, la provisión de alimento a las aves marinas⁵² y el transporte de nutrientes. Al introducir una nueva presión selectiva dominante, la pesca afecta probablemente también el carácter genético de las poblaciones, transformándose así en un agente agudo de selección frente al cual solamente algunas especies son capaces de responder.

Existen varios factores que han contribuido a la sobreexplotación. Uno de ellos es la falta de cooperación entre las personas que explotan los recursos naturales en un sistema de libre acceso, donde no existen dueños ni propiedad privada, como es el mar. En este sistema, si los pescadores actúan de forma individual con el fin de conseguir el mayor beneficio propio, se genera una “carrera olímpica” entre ellos para acceder a los recursos, ya que la extracción de recursos por un individuo disminuye su disponibilidad para otros. Esta competencia va a promover una explotación no sustentable, ya que los pescadores van a acelerar la actividad pesquera para obtener el máximo de capturas posibles, hasta el punto en el que el sistema marino ya no puede sustentar el nivel de extracción. Esto se conoce como la Tragedia de los Comunes⁵³.

La falta o la ineffectividad de regulación en la pesca también han favorecido la sobreexplotación. Una de las regulaciones que se aplican para evitar la sobreexplotación es la reducción de la actividad de pesca o el esfuerzo de pesca. Para ello se establecen capturas máximas de extracción (cuotas) que aseguran el mantenimiento de

una población natural en el mar con capacidad para renovar el recurso en el tiempo. Si la abundancia de los recursos disminuye de forma crítica, la regulación puede consistir en un cierre de la pesquería para promover su restauración a niveles sustentables de extracción. Por ejemplo, el cierre de la pesquería de anchoa del Cantábrico (*Engraulis encrasicolus*) entre 2005 y 2010 permitió su recuperación desde el estado de colapso en el que se encontraba⁵⁴. Pero en general las regulaciones pesqueras no han sido lo suficientemente efectivas como para reducir la sobreexplotación. En parte esto es debido a que las regulaciones han estado enfocadas a regular especies concretas y no ecosistemas⁵⁵ y en parte porque las presiones económicas o políticas supeditan las recomendaciones técnicas de manejo⁵⁶.

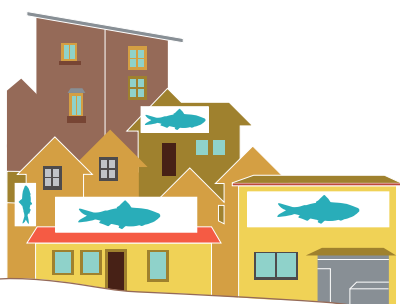
Otro factor clave que ha generado sobreexplotación es la industrialización de las pesquerías⁵⁷. El desarrollo tecnológico de la industria pesquera ha permitido su expansión geográfica, el uso de barcos de gran tamaño, el empleo de enormes artes de pesca y de dispositivos capaces de localizar los bancos de peces con alta precisión (ej. radar, sonar). Además, existen buques factoría con la capacidad de capturar, procesar y congelar recursos mientras se desplazan por lo que pueden pasar años en altamar y llegar a zonas muy lejanas. La industrialización de la pesquería es muy efectiva desde un punto de vista tecnológico, pero desde una perspectiva ecológica ha resultado ser catastrófica ya que no permite que los recursos crezcan y se reproduzcan. Con la globalización de la pesquería industrial la sobreexplotación se ha convertido en un problema de seguridad alimentaria especialmente en aquellos países en vías de desarrollo que dependen de los recursos marinos para subsistir.

La sobreexplotación de las pesquerías ha sido ampliamente atribuida a la pesquería industrial, pero las pesquerías artesanales también son un componente importante de esta crisis. La pesca artesanal se ha visto afectada por la drástica disminución de la abundancia de los stocks, la presión económica por la subsistencia diaria, la falta de empleos alternativos en zonas rurales, el aumento de la demanda de mercado local y extranjero, y el incremento exponencial

TRASTORNOS DE LA INDUSTRIA PESQUERA EN LOS ECOSISTEMAS MARINOS Y LA ECONOMÍA

La industria pesquera se ve afectada por las consecuencias del cambio climático y a la vez las agrava. El calentamiento global trastorna los ecosistemas marinos, provocando disminución del número de ejemplares y migraciones que pueden trascender los límites de los países, modificando el equilibrio oferta-demanda. Las principales causas de estos trastornos son: el aumento de la temperatura y acidificación del océano, la sobreexplotación y el comportamiento del mercado.

1 COMPORTAMIENTO DEL MERCADO



200 MILLONES DE PERSONAS SON BENEFICIADAS POR LA **ECONOMÍA PESQUERA**

La exportación incentiva la producción, pero no considera el impacto en los ecosistemas.

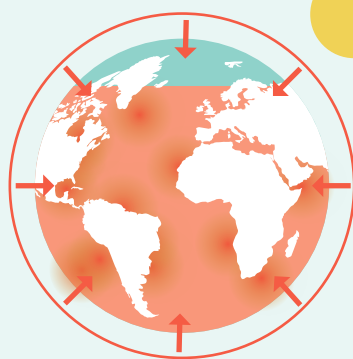
La gran demanda de los países desarrollados es cubierta por los países de ingresos medio bajo.

La alta demanda, principalmente desde mercados lejanos, incentiva la pesca ilegal y sobreexplotación local.

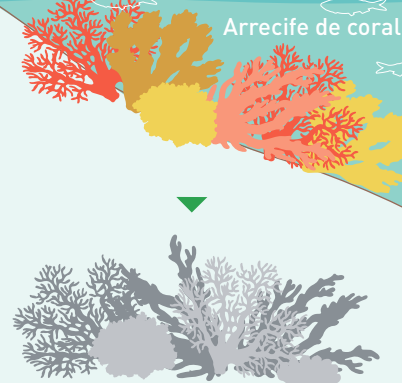
43,5 MILLONES DE PERSONAS TRABAJAN EN EL SECTOR PESQUERO

20 VECES MÁS PERSONAS SON EMPLEADAS DIRECTAMENTE POR LAS PESQUERÍAS COSTERAS O ARTESANALES QUE POR LA PESQUERÍA INDUSTRIAL

2 AUMENTO DE LA TEMPERATURA EN EL MAR



EL **90%** DEL INCREMENTO DE LA **TEMPERATURA** EN LA TIERRA ES **ABSORBIDO** POR EL MAR

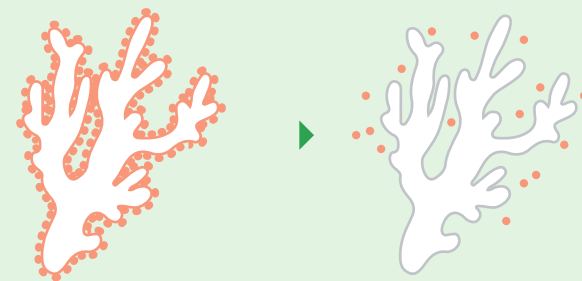


3 ACIDIFICACIÓN DEL OCÉANO

LA **ACIDEZ DEL OCÉANO** HA AUMENTADO EN UN **30%** EN LOS ÚLTIMOS **200 AÑOS**

EN LOS PRÓXIMOS **30 AÑOS** LA PRODUCTIVIDAD DE ESPECIES COMERCIALES PODRÍA **DISMINUIR** EN UN **30%**

LA PÉRDIDA DEL **50%** DE LOS **ARRECIFES DE CORAL** DEL CARIBE PODRÍA SUPONER UNA **PÉRDIDA ANUAL** DE **195.319 MILLONES DE DÓLARES** EN PESQUERÍA



Blanqueamiento del coral

Uno de los efectos más dramáticos y visibles del aumento en la temperatura superficial del mar ha sido el blanqueamiento de corales tropicales y subtropicales. Estos corales albergan además la mayor diversidad de especies marinas de todo el planeta.

4 SOBREEXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS MARINOS

La extracción es en sí misma un agente de cambio global

Estado de las pesquerías 2013

31,5%

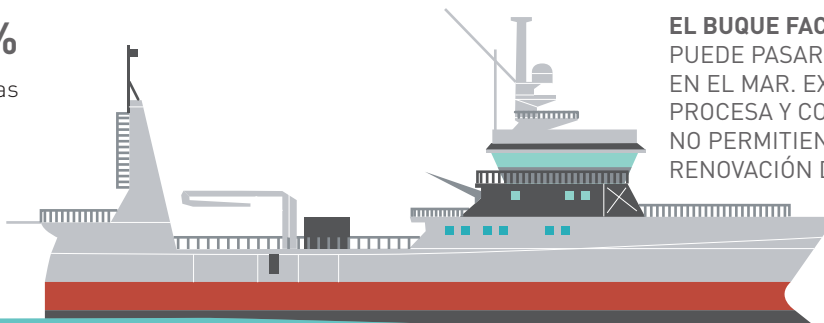
Sobreexplotadas

58,1%

En plena explotación

10,5%

Subexplotadas

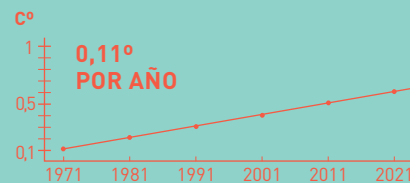


EL BUQUE FACTORÍA
PUEDE PASAR AÑOS
EN EL MAR. EXTRAE,
PROCESA Y CONGELA,
NO PERMITIENDO LA
RENOVACIÓN DE ESPECIES

2/3

DE LOS PECES DE
INTERÉS COMERCIAL
**CAMBIARÁN DE LATITUD
O PROFUNDIDAD** POR
EL AUMENTO DE LA
TEMPERATURA

Aumento promedio de la
temperatura de la capa superficial



CO₂

CO₂

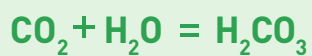
CO₂

CO₂

CO₂

CO₂

CO₂



Ácido carbónico

Proceso de acidificación

Cambios en temperatura del mar, acidificación, contaminación y la extracción pesquera se conjugan para imponer fuertes estresores sobre la vida marina.

LA ACIDIFICACIÓN
DEL OCÉANO
**DEBILITA CONCHAS,
CAPARAZONES Y
ESQUELETOS**

y repercute también en el
crecimiento de las especies.



DEBIDO A ESTOS MÚLTIPLES ESTRESORES, ENTRE EL **2000**
Y EL **2050** EL PESO CORPORAL DE PECES E INVERTEBRADOS
DISMINUIRÁ ENTRE UN

14% Y 24%

del precio de las especies que extraen. La interacción de todos estos factores combinados con el fácil acceso a los recursos y especialmente la falta de regulación efectiva de la pesca, ha promovido la intensificación y sobre-explotación de recursos de la pesca artesanal^{58,59}. En la actualidad, la sobreexplotación pesquera amenaza el sustento, reduce el bienestar económico y limita el aporte nutricional a las comunidades que dependen de estos recursos para subsistir.

La pesca ilegal también es uno de los factores que favorecen la sobreexplotación. Una parte importante de las capturas mundiales proviene de la pesca ilegal y ocurre tanto en pesquerías industriales como artesanales. Las capturas ilegales no están registradas, por lo que no permiten conocer la cantidad real de recursos marinos que se extraen del mar y evaluar correctamente el estado de explotación de las pesquerías. Esto supone un grave problema a la hora de manejar las pesquerías, ya que un mal manejo puede llevar a su sobreexplotación o colapso. Por ejemplo, la pesquería de merluza negra o el bacalao de profundidad ha sido sobreexplotado debido a la pesca ilegal de países como Chile y Uruguay. El incentivo es muy alto ya que se vende en el mercado ilegal a 24 dólares el kilogramo. El incremento de la demanda promueve la pesca ilegal. Pero aparte del impacto directo de la pesca ilegal sobre los recursos, su ocurrencia y la falta de regulación y de castigo efectivo genera una gran decepción por parte de quienes sí se apegan a la normativa, promoviendo así que otros quebranten las leyes de regulación.

La falta de cooperación y de regulación efectiva, la industrialización de la pesca y la pesca ilegal son algunos de los factores que promueven la sobreexplotación de las pesquerías

Se ha tomado cada vez más conciencia de la importancia de entender los aspectos humanos de las pesquerías y de centrarse en la gobernanza pesquera más que sólo en aspectos de ordenación. Actualmente se está prestando mayor atención a los incentivos creados por las medidas

de gestión y los acuerdos institucionales en torno a la pesca, incluida la incorporación de los pescadores locales y sus conocimientos a través de co-gestión e iniciativas comunitarias de gestión^{60,61}. Esta tendencia ha estado acompañada por el reconocimiento de la necesidad de tener en cuenta los ecosistemas dentro en los cuales se insertan las pesquerías. Tanto el compromiso de las partes interesadas como la toma en consideración del ecosistema amplio son elementos que se han incorporado en el enfoque ecosistémico de la pesca⁶². Se estima que la recuperación de las pesquerías **sobreexplotadas** incrementaría la producción en 16.5 millones de toneladas (20,7% de la captura global marina en 2012 según la FAO), aumentando en 32 billones de USD la renta anual. Este aumento ayudaría a incrementar la contribución de las pesquerías en la mejora de la seguridad alimentaria, la economía y el bienestar de las comunidades costeras y a estar mejor preparadas para para afrontar estresores de cambio global. Ciertamente, el cambio global implica un enorme desafío para quienes gestionan los recursos marinos. Más allá de la imprecisión de los modelos biofísicos en los cuales se basan las predicciones de cambios futuros en las pesquerías industriales y artesanales, la gestión efectiva debe considerar además la capacidad de adaptación de los pescadores a estos cambios, evitando que se desencadene una decepción generalizada por estrategias de gestión que no son totalmente efectivas en escenarios climáticos cambiantes.

1.4 Mercados globales

Los productos marinos son los alimentos más comercializados internacionalmente y por lo tanto su producción está determinada por las fuerzas del mercado global. Históricamente, los mercados de exportación han generado grandes incentivos para aumentar la producción, sin tener en cuenta el impacto local que pueden generar sobre los ecosistemas y la sociedad⁶³. En muchas ocasiones el continuo aumento de la producción ha causado la sobreexplotación y colapso de muchas pesquerías, especialmente aquellas que no están reguladas de forma efectiva⁶⁴. Por ejemplo, el atún rojo pasó de



La complejidad de la demanda global de productos del mar; representada en el barrio chino de Nueva York donde se comercializa el pepino de mar proveniente de diferentes regiones de sud América. Foto Stefan Gelcich

ser alimento de animales de compañía a principios de siglo XX a convertirse en el pescado más valorado del mundo a mediados del mismo siglo como resultado de la demanda de sushi y sashimi⁶⁵. En la actualidad el atún rojo (*Thunnus thynnus*) se encuentra en peligro⁶⁶ y su explotación no ha cesado debido a la continua demanda y gran valor económico.

En este mercado global los países desarrollados son los que generan una gran demanda de productos marinos, la cual es cubierta mayoritariamente por países de ingreso medio o bajo. Los países de ingreso bajo, a pesar de tener altos índices de desnutrición, optan por la exportación de sus recursos debido a los grandes beneficios económicos

que genera. La continua demanda y la sobreexplotación reduce la capacidad de las pesquerías para promover la seguridad alimentaria en estos países⁶⁷.

En el caso de Latinoamérica, en los 80s y 90s, las pesquerías artesanales bentónicas se intensificaron debido a la gran demanda por parte de países extranjeros en donde sus recursos se encontraban ya sobreexplotados. En un principio la apertura de la pesca artesanal al mercado global produjo grandes beneficios económicos para las comunidades locales ya que generaban mayor empleo y mayores ingresos. Sin embargo, el continuo crecimiento de la población humana, especialmente en países asiáticos, con el consecuente aumento persistente de la demanda

e incremento del valor de estos recursos, así como la falta de regulación y el fácil acceso para capturarlos incentivaron la extracción desmedida de los recursos hasta que llegaron a estados de abierto colapso. En Chile, algunos ejemplos de pesquerías **colapsadas** producto de la demanda internacional fueron la macha (*Mesoddesma donacium*) y el loco (*Concholepas concholepas*), en Uruguay la macha (*Mesodesma mactroides*) y en Ecuador el pepino de mar^{68,69}.

Gran parte de la pesca ilegal existe como resultado de los incentivos generados por el mercado^{70,71}. Uno de los mercados que más promueven la pesca ilegal es el mercado asociado a productos exóticos, lujosos y afrodisíacos de los países asiáticos. La demanda por productos exóticos ha existido durante cientos de años en estos países, pero en la actualidad una mayor población tiene acceso a éstos. Las aletas de tiburón, la vejiga natatoria del pez totoaba (*Totoaba macdonaldi*), los pepinos de mar, el abalón tamaño canapé o el loco de Chile son algunos de los productos demandados por este tipo de mercado. Esto ha generado una gran presión pesquera sobre estas especies en todo el mundo^{72,73,74}. Esta demanda del mercado chino por productos exóticos y afrodisíacos seguirá continuando cuando estos recursos hayan colapsado y otros recursos se convertirán en el objetivo de estos mercados. La pesca ilegal no sólo existe como resultado de la demanda de productos de alto valor por parte de países extranjeros, sino que también es incentivada por la necesidad de subsistencia de las comunidades costeras. Aquellas comunidades que se encuentran en estado de pobreza y sin alternativas de empleo a las que acceder cuando una pesquería está **sobreexplotada**, optan por seguir sobreexplotando la pesquería a pesar de que esta esté regulada.

Actualmente en el mundo un gran desafío es el desarrollar sistemas de gobernanza para las pesquerías que permitan a instituciones de regulación pesquera afrontar los desafíos que vienen desde la demanda internacional de productos marinos

2. Vulnerabilidad de pesquerías frente al cambio global

El efecto que produzca el cambio global sobre las pesquerías va a depender del nivel de la vulnerabilidad de las poblaciones de recursos de importancia económica, de los ecosistemas marinos y de las comunidades de pescadores. Comprender los factores que hacen vulnerables a las pesquerías es crítico para priorizar la inversión en la generación de estrategias y políticas públicas que amortigüen los efectos del cambio global sobre los ecosistemas y comunidades de personas que de ellos dependen (Figura 2). A continuación, se describe a que se refieren los diferentes componentes de la vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa).

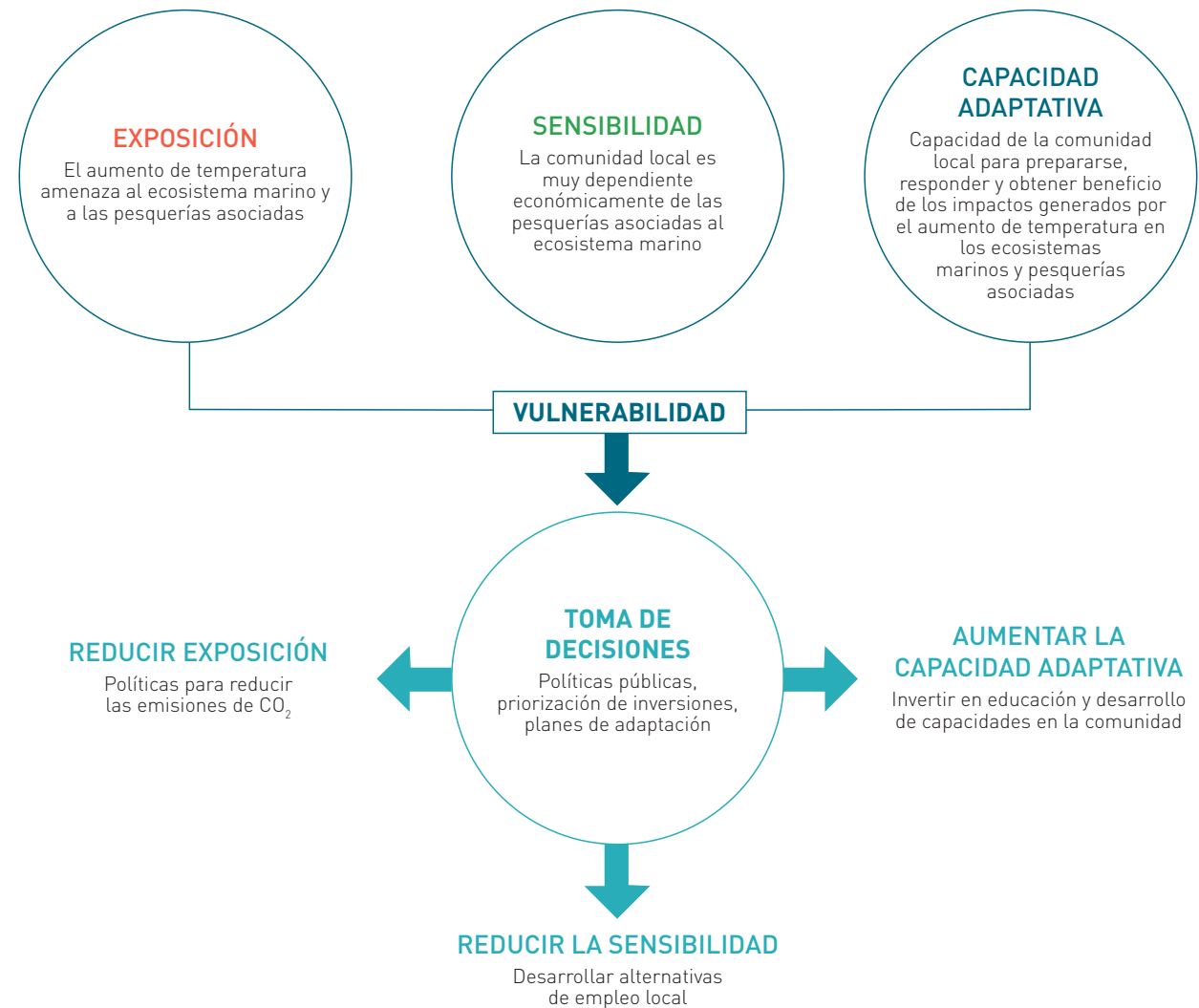
2.1 Exposición

La exposición está determinada por la magnitud, frecuencia y duración de una o varias amenazas extrínsecas que afectan a una especie o ecosistema. Las pesquerías están expuestas a amenazas de cambio global como el aumento de la temperatura, la sobreexplotación, la acidificación o las fuerzas de mercado. La exposición varía geográfica y temporalmente, pues va a depender de las condiciones oceanográficas, de la latitud y de las actividades humanas que se realicen. Por ejemplo, los ecosistemas tropicales y de mares semi-encerrados (ej. Mar Mediterráneo) van a tener una mayor exposición a altas temperaturas y sus pesquerías serán más vulnerables al cambio global que las pesquerías de otras zonas que no experimenten estos incrementos de temperatura.

2.2 Sensibilidad

La sensibilidad es el nivel de susceptibilidad intrínseca del sistema natural o humano ante las amenazas externas a las cuales están expuestos. La sensibilidad de los ecosistemas y poblaciones de organismos marinos dependerá de la tolerancia que tengan a las amenazas del cambio global. Por ejemplo, aquellas poblaciones de organismos y ecosistemas que resistan variaciones en la temperatura

Figura 2. Marco conceptual que establece la importancia de comprender las diferentes dimensiones de la vulnerabilidad de una pesquería (exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa) para tomar decisiones que promuevan su resiliencia. Adaptado de Ektrom *et al.* (2015)⁷³ y Cinner *et al.* (2012)⁷⁴.



serán menos sensibles y por lo tanto menos vulnerables al cambio climático que aquellas que no toleren estas variaciones. En el caso de las comunidades locales que extraen los recursos marinos, su sensibilidad estará determinada por factores como el nivel de dependencia en el recurso o las tecnologías que usan para pescar. Las comunidades que pescan una gran variedad de especies o que tienen acceso a trabajos alternativos a la pesca serán menos vulnerables al cambio global.

2.3 Capacidad adaptativa

La capacidad adaptativa es la habilidad de modificar, absorber y recuperarse de los impactos negativos causados por una amenaza y sacar partido de las oportunidades que surgen de ésta. La capacidad adaptativa puede contrarrestar altos niveles de exposición y sensibilidad e incluso beneficiar a una comunidad de los efectos del cambio

climático. Por ejemplo, una comunidad de pescadores con alta dependencia de los recursos marinos de la zona será vulnerable ante el cambio climático, ya que el aumento de temperatura puede generar un cambio en la distribución de especies y provocar la extinción local de la especie o especies de las que dependen. Pero esta comunidad podría reducir su vulnerabilidad si desarrolla la capacidad de adaptarse a este aumento de temperatura, por ejemplo mediante el aprovechamiento de nuevas especies que llegan a la zona. La capacidad para adaptarse a nuevos “modos de vida”, el uso de nuevas tecnologías con las que aprovechar otros recursos o la capacidad de aumentar la **resiliencia** de los ecosistemas va a reducir la vulnerabilidad de las comunidades pesqueras al cambio global.

Comprender qué hace vulnerable a las pesquerías, ecosistemas y comunidades que dependen de los recursos marinos es crítico para poder mitigar los efectos de los sistemas ecológicos y humanos al cambio global. Una

vez que conocemos las diferentes dimensiones de la vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa), podemos diseñar estrategias que promuevan la **resiliencia** de los sistemas ecológicos y humanos al cambio global. Algunas acciones estarán enfocadas a reducir la exposición, otras a minimizar la sensibilidad y otras a incrementar la capacidad adaptativa.

Las estrategias que promuevan la sustentabilidad de los sistemas ecológicos y humanos deben estar dirigidos a reducir la exposición, reducir la sensibilidad y aumentar la capacidad adaptativa

Estas acciones deben realizarse a nivel local, nacional e internacional ya que los diferentes factores de cambio global actúan a diferentes escalas. Las acciones también deben diferenciarse según la escala temporal correspondiente. Habrá estrategias que se planteen para reducir la vulnerabilidad a corto plazo. Por ejemplo, el cierre de una zona de costa para evitar la sobreexplotación, la diversificación de las pesquerías hacia la captura de nuevas especies o el uso de nuevas tecnologías. Otras estrategias se plantearán para reducir la vulnerabilidad a largo plazo, como por ejemplo el desarrollo de políticas para reducir las emisiones de CO₂, la transición hacia modos de vida fuera de la pesca, la reducción de la pobreza o la inversión en educación.

3. Conclusiones

La sobreexplotación, el aumento de temperatura del mar, la intensificación de los gradientes térmicos tierra-océano y los procesos de surgencia y circulación costera, la disponibilidad de oxígeno y la acidificación de los océanos, así como el mercado cada vez más globalizado, son factores importantes de cambio global que tienen una gran influencia sobre la sustentabilidad de las pesquerías. La tendencia general es que estas perturbaciones aumentarán en el tiempo, y se prevé que siga así en el futuro si no

se reduce el impacto humano sobre la naturaleza. Existe todavía gran incertidumbre sobre el efecto del cambio global en los distintos ecosistemas marinos y sobre sus pesquerías, sobre todo en países donde ha habido menor financiamiento para la ciencia⁷⁵. La mayoría de los estudios se han enfocado en entender cómo afecta el cambio global a las especies, pero existe un gran desconocimiento sobre el efecto a nivel ecosistémico y de bienestar humano. Los cambios en la estructura del ecosistema, la interacción entre especies y las redes tróficas van a definir los impactos del cambio global en las pesquerías, por lo tanto, comprender cómo el ecosistema está influenciado por el cambio global es de gran relevancia. Ante esta incertidumbre es vital tomar las medidas necesarias para reducir la vulnerabilidad de las pesquerías y ecosistemas ante el cambio global, las cuales pueden estar dirigidas a reducir la exposición de los factores, reducir la sensibilidad del sistema natural y humano, y/o generar capacidad adaptativa. De esta manera se incrementa la capacidad de los ecosistemas para absorber tanto los impactos naturales como de origen humano y así evitar su degradación.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 McClanahan, T.R., Castilla, J.C., White, A.T. & Defeo O. Healing small-scale fisheries by facilitating complex socio-ecological systems. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 19, 33–47 (2009).
- 2 Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D.W. & Medina-Elizade, M. Global temperature change. *Proc Natl Acad Sci USA* 103, 14288–93 (2006).
- 3 IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (2014).
- 4 Hoegh-Guldberg, O. & Bruno, J. The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science* 328, 1523–8 (2010).
- 5 Dulvy, N.K., Rogers, S.I., Jennings, S., Stelzenmüller, V., Dye, S.R., Skjoldal, H.R. Climate change and deepening of the North Sea fish assemblage: A biotic indicator of warming seas. *Journal of Applied Ecology* 45, 1029–39 (2008).
- 6 Perry, A.L., Low, P.J., Ellis, J.R. & Reynolds, J.D. Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* 308, 1912–5 (2005).
- 7 Cheung, W.W.L., Watson, R. & Pauly, D. Signature of ocean warming in global fisheries catch. *Nature* 497, 365–8 (2013).
- 8 Cheung, W.W.L., *et al.* Climate-change induced tropicalisation of marine communities in Western Australia. *Marine and Freshwater Research* 63, 415–27 (2012).

- 9 Hobday, A.J. Ensemble analysis of the future distribution of large pelagic fishes off Australia. *Progress in Oceanography* 86, 291–301 (2010).
- 10 Cheung, W.W.L., Lam, V.W.Y., Sarmiento, J.L., Kearney, K., Watson, R. & Pauly, D. Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries* 10, 235–51 (2010).
- 11 Cheung, W.W.L., *et al.* Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global Change Biology* 16, 24–35 (2010).
- 12 Cheung, W.W.L., Jones, M.C., Reygondeau, G., Stock, C.A., Lam, V.W.Y. & Frölicher T.L. Structural uncertainty in projecting global fisheries catches under climate change. *Ecological Modelling* 325, 57–66 (2016).
- 13 Brander, K.M. Global fish production and climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* 104, 19709–19714 (2007).
- 14 Brander, K. Impacts of climate change on fisheries. *Journal of Marine Systems* 79, 389–402 (2010).
- 15 Berkelmans, R. & Oliver, J.K. Large-scale bleaching of corals on the Great Barrier Reef. *Coral Reefs* 18, 55–60 (1999).
- 16 Vergara, W., Toba, N., Mira-Salama, D. & Deeb, A. The Potential Consequences of Climate-induced Coral Loss in the Caribbean by 2050–2080. *LCR Sustainable Development Working Papers* 2009, 48–58 (2009).
- 17 Bouchet, P. The magnitude of marine biodiversity. En, Duarte C.M., editor. *The Exploitation of Marine Biodiversity: Scientific and Technological Challenges*. Bilbao: Fundación BBVA (2006).
- 18 Mumby, P.J., *et al.* Towards reef resilience and sustainable livelihoods: a handbook for Caribbean coral reef managers (2014).
- 19 Wilson, S.K., Graham, N.A., Pratchett, M.S., Jones, G.P. & Polunin, N.V. Multiple disturbances and the global degradation of coral reefs : are reef fishes at risk or resilient? *Global Change Biology* 12, 2220–2234 (2006).
- 20 Wernberg, T. *et al.* Climate-driven shift of a temperate marine ecosystem. *Science* 353, 169–72 (2016).
- 21 Voerman, S.E., Llera, E. & Rico, J.M. Climate driven changes in subtidal kelp forest communities in NW Spain. *Marine Environmental Research* 90, 119–27 (2013).
- 22 Long, M.C., Deutsch, C. & Ito, T. Finding forced trends in oceanic oxygen. *Global Biogeochem Cycles* 30, 381–97 (2016).
- 23 Gray, J.S., Wu, R.S. & Or, Y.Y. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. *Marine Ecology Progress Series* 238, 249–79 (2002).
- 24 Cheung, W.W.L. *et al.* Shrinking of fishes exacerbates impacts of global ocean changes on marine ecosystems. *Nature Climate Change* 3, 254–8 (2012).
- 25 Shaffer, G. & Olsen, S.M. Long-term ocean oxygen depletion in response to carbon dioxide emissions from fossil fuels. *Nature Geoscience* 2, 105–109 (2009).
- 26 Bakun, A. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science* 247, 198–201 (1990).
- 27 García-Reyes, M. & Largier, J. Observations of increased wind-driven coastal upwelling off Central California. *J Geophysical Research: Oceans* 115, 1–8 (2010).
- 28 Wang, D., Gouhier, T.C., Menge, B.A. & Ganguly A.R. Intensification and spatial homogenization of coastal upwelling under climate change. *Nature* 518, 390–394 (2015).
- 29 Aiken, C.M., Castillo, M.I. & Navarrete, S.A. A simulation of the Chilean Coastal Current and associated topographic upwelling near Valparaíso, Chile. *Continental Shelf Research* 28, 2371–2381 (2008).
- 30 Doney, S.C., Fabry, V.J., Feely, R.A. & Kleypas, J.A. Ocean acidification: The other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science* 1, 169–192 (2009).
- 31 Sabine, C.L. *et al.* The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science* 305, 367–71 (2004).
- 32 Feely, R.A. *et al.* Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science* 305, 362–6 (2004).
- 33 Caldeira, K. & Wickett, M.E. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *Journal of Geophysical Research* 110, C09S04 (2005).
- 34 Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R.N., Singh, G.G. Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms. *Ecology Letters* 13, 1419–34 (2010).
- 35 Heuer, R.M., Grosell, M. Physiological impacts of elevated carbon dioxide and ocean acidification on fish. *AJP Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 307, R1061–R1084 (2014).
- 36 Fabry, V.J., Seibel, B.A., Feely, R.A. & Orr, J.C. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science* 65, 414–32 (2008).
- 37 Richardson, A.J. & Schoeman, D.S. Climate impact on plankton ecosystems in the Northeast Atlantic. *Science* 305, 1609–12 (2004).
- 38 Cooley, S.R. & Doney, S.C. Anticipating ocean acidification's economic consequences for commercial fisheries. *Environmental Research Letters* 4, 24007 (2009).
- 39 Narita, D., Rehdanz, K. & Tol, R.S.J. Economic costs of ocean acidification: A look into the impacts on global shellfish production. *Climate Change* 113, 1049–63 (2012).
- 40 Navarro, J.M., *et al.* Impact of medium-term exposure to elevated pCO₂ levels on the physiological energetics of the mussel *Mytilus chilensis*. *Chemosphere* 90, 1242–8 (2013).
- 41 Duarte, C.M., *et al.* Reconsidering ocean calamities. *Bioscience* 65, 130–9 (2015).
- 42 Pauly, D., *et al.* Towards the sustainability in world fisheries. *Nature* 418, 689–95.
- 43 FAO. *Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura* (2016).
- 44 Costello, C., Ovando, D., Hilborn, R., Gaines, S.D., Deschenes, O. & Lester, S.E. Status and solutions for the world's unassessed fisheries. *Science* 338, 517–20 (2012).
- 45 Pauly, D., Christensen, V., Dalsgaard, J., Froese, R., Torres, F. Fishing down marine food webs. *Science* 279, 860–3 (1998).
- 46 Allan, J.D., *et al.* Overfishing of Inland Waters. *Bioscience* 55, 1041–1051 (2005).
- 47 Salomon, A.K., Gaichas, S.K., Shears, N.T., Smith, J.E., Madin, E.M.P. & Gaines, S.D. Key features and context-dependence of fishery-induced trophic cascades. *Conservation Biology* 24, 382–94.
- 48 Kaiser, M.J., Collie, J.S., Hall, S.J., Jennings, S., Poiner, I.R. Modification of marine habitats by trawling activities: Prognosis and solutions. *Fish and Fisheries* 3, 114–36 (2002).
- 49 Worm, B. *et al.* Impacts of biodiversity loss on ocean ecosystem services. *Science* 314, 787–90 (2006).
- 50 Myers, R.A., Baum, J.K., Shepherd, T.D., Powers, S.P. & Peterson, C.H. Cascading effects of the loss of apex predatory sharks from a coastal ocean. *Science* 315, 1846–1850 (2007).
- 51 Bellwood, D.R., Hoey, A.S. & Choat, J.H. Limited functional redundancy in high diversity systems: Resilience and ecosystem function on coral reefs. *Ecology Letters* 6, 281–285 (2003).

- 52 Jahncke, J., Checkley, D.M. Jr. & Hunt, G.L. Jr. Trends in carbon flux to seabirds in the Peruvian upwelling system: effects of wind and sheries on population regulation. *Fisheries Oceanography* 13, 208–223 (2004).
- 53 Hardin, G. The tragedy of the commons. *Science* 12, 1243–1248 (1968).
- 54 Santos, M., Uriarte, A. & Ibaibarriaga, L. Spawning stock biomass estimates of the Bay of Biscay anchovy (*Engraulis encrasicolus*, L.) in 2010 applying the daily egg production method. *Revista de Investigaciones Marinas* 18, 76–91 (2010).
- 55 Barange, M. Ecosystem science and the sustainable management of marine resources: from Rio to Johannesburg. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1, 190–196 (2003).
- 56 Leal, C.P., Quiñones, R.A. & Chávez, C. What factors affect the decision making process when setting TACs?: The case of Chilean fisheries. *Marine Policy* 34, 1183–95 (2010).
- 57 Pauly, D., Watson, R. & Alder, J. Global trends in world fisheries: impacts on marine ecosystems and food security. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 360, 5–12 (2005).
- 58 Defeo, O. & Castilla, J.C. More than one bag for the world fishery crisis and keys for co-management successes in selected artisanal Latin American shellfisheries. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 15, 265–283 (2005).
- 59 McClanahan, T.R. & Castilla, J.C. (eds) *Fisheries Management. Progress Toward Sustainability*. John Wiley & Sons (2007).
- 60 Castilla, J.C. The Chilean small-scale benthic shellfisheries and the institutionalization of new management practices. *Ecology International Bulletin* 21, 47–63 (1994).
- 61 Gelcich, S., *et al.* Navigating transformations in governance of Chilean marine coastal resources. *Proc Natl Acad Sci USA* 107, 16794–16799 (2010).
- 62 Gelcich, S., *et al.* Marine ecosystem-based management in the Southern Cone of South America: Stakeholder perceptions and lessons for implementation. *Marine Policy* 33, 801–6 (2009).
- 63 Clarke, S. Understanding pressures on fishery resources through trade statistics: A pilot study of four products in the Chinese dried seafood market. *Fish and Fisheries* 5, 53–74 (2004).
- 64 Crona, B.I., *et al.* Towards a typology of interactions between small-scale fisheries and global seafood trade. *Marine Policy* 65, 1–10 (2016).
- 65 Clark, B. & Clausen, R. Clark, B., & Clausen, R. (2008). The oceanic crisis: Capitalism and the degradation of marine ecosystems. *Monthly Review* 60, 91–111 (2008).
- 66 Collette, B., *et al.* *Thunnus thynnus*. The IUCN Red List of Threatened Species. vol. e.T21860A9. (2011).
- 67 Smith, M.D., *et al.* Sustainability and global seafood. *Science* 327, 784–786 (2010).
- 68 Defeo, O. & Castilla, J.C. Governance and governability of coastal shellfisheries in Latin America and the Caribbean: Multi-scale emerging models and effects of globalization and climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 344–350 (2012).
- 69 Castilla, J.C., Espinosa, J., Yamashiro, C., Melo, O., & Gelcich S. Telecoupling Between Catch, Farming, and international trade for the gastropods *Concholepas concholepas* (Loco) and *Haliotis* spp. (Abalone). *Journal of Shellfish Research* 35, 499–506 (2016).
- 70 Le Gallic, B. & Cox, A. An economic analysis of illegal, unreported and unregulated (IUU) fishing: Key drivers and possible solutions. *Marine Policy* 30, 689–695 (2006).

- 71 Eriksson, H., Clarke, S. Chinese market responses to overexploitation of sharks and sea cucumbers. *Biological Conservation* 184, 163–173 (2015).
- 72 Charles, A. People, oceans and scale: Governance, livelihoods and climate change adaptation in marine social-ecological systems. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 4, 351–357 (2012).
- 73 Ekstrom, J.A., *et al.* Vulnerability and adaptation of US shellfisheries to ocean acidification. *Nature Climate Change* 5, 207–214 (2015).
- 74 Cinner, J.E., *et al.* Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries. *Global Environmental Change* 22, 12–20 (2012).
- 75 Turra, A., *et al.* Global environmental changes: Setting priorities for Latin American coastal habitats. *Global Change Biology* 19, 1965–1969 (2013).

REFERENCIAS COMENTADAS

Crona et al. Towards a typology of interactions between small-scale fisheries and global sea food trade. *Marine Policy* 65, 1-10 (2016).

Este estudio examina la relación entre las pesquerías de pequeña escala y el mercado global. A partir de la Teoría de Mercado identifica tres procesos a través de los cuales la producción local está conectada al mercado global de productos marinos. Estos procesos son: el Mercado de exportación, el Mercado de competencia y el “Mercado de efecto colateral”. El estudio analiza la co-existencia y la interacción de estos procesos en 24 casos de estudio de diferentes zonas del mundo y refleja la complejidad de la dinámica e interacción entre la producción local y el Mercado global.

Cheung et al. Large redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. *Global change biology* 16, 24-35 (2010).

Este estudio realiza predicciones globales, a través de modelos matemáticos, sobre la influencia del cambio climático en las capturas de 1066 especies de invertebrados y peces de interés comercial entre los años 2005 y 2055. El estudio concluye que las capturas aumentarán entre 30-70% en latitudes altas, mientras que en los trópicos las capturas disminuirán un 40%, lo que supone una redistribución de las capturas a nivel global.

Kroeker et al. Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms. *Ecology letters* 13, 1419:1434 (2010).

Este estudio es un meta-análisis que explora los efectos de la acidificación oceánica sobre diferentes parámetros biológicos de los organismos marinos. A nivel general el estudio concluye que existe un efecto negativo de la acidificación sobre varios procesos biológicos como la reproducción, el crecimiento, la calcificación y la reproducción. Pero resalta que los efectos de la acidificación son diferentes entre grupos taxonómicos y entre diferentes fases de desarrollo. Por ejemplo los organismos calcificadores y los estados juveniles de algunos organismos son más sensibles a la acidificación. La variabilidad en la sensibilidad de diferentes organismos y estados de desarrollo ante la acidificación va a tener consecuencias en la interacción entre las diferentes especies y en la estructura y función de los ecosistemas, la cual no fue evaluada en este estudio.

Narita et al. Economic costs of ocean acidification: a look into the impacts on global shellfish production. *Climate change* 113, 1049-1063 (2012).

Este estudio realiza una de las primeras evaluaciones de los impactos económicos globales en la producción marina que tendrán lugar como resultado de la acidificación oceánica. El estudio se centra en el impacto económico sobre la acuicultura de moluscos a nivel mundial y consiste en estimar las pérdidas económicas que se generarán en el año 2100 bajo un escenario de cambio climático. El estudio estima una pérdida global de 6000 millones de USD si la demanda de moluscos se mantiene constante, pero podría llegar a ser de 100.000 millones USD si la demanda de moluscos aumenta en el futuro. Estas estimaciones están muy influenciadas por China, ya que es el mayor productor de moluscos a nivel mundial. El estudio hace énfasis en la falta de evidencia que existe sobre el impacto biológico de la acidificación, su interacción con otros factores de cambio global y la capacidad de adaptación de los organismos a la acidificación.

Cinner et al. Vulnerability of coastal communities to key impacts of climate change on coral reef fisheries. *Global Environmental Change* 22 (1), 12-20 (2012).

El estudio examina tres dimensiones de la vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa) ante el problema del blanqueamiento de coral en 29 comunidades de cinco países localizadas en el Oeste del Océano Índico. Determina las diferencias de vulnerabilidad entre sitios, enfatiza la necesidad de desarrollar estrategias para reducir la vulnerabilidad de cada lugar específico y propone diferentes acciones políticas dirigidas a disminuir la exposición y la sensibilidad y aumentar la capacidad adaptativa de las comunidades y ecosistemas a diferentes escalas temporales y especiales.

Duarte et al. Reconsidering ocean calamities. *Bioscience* 65, 130-139 (2015).

Este estudio hace un análisis de la evidencia que existe en relación a los factores de cambio global que afectan negativamente a los océanos, como la sobreexplotación, la proliferación de algas nocivas, la acidificación o la propagación de especies invasoras. Existe la percepción tanto en la comunidad científica como en la sociedad de que muchos de estos factores tienen un impacto negativo en los ecosistemas y sociedad, que son debidos a la actividad humana y que operan a escala global. Este estudio afirma que estas percepciones no están basadas en una evidencia robusta, ya que existe mucha incertidumbre al respecto, y que por lo tanto existen ideas erróneas sobre la naturaleza y envergadura de estos factores de cambio global.

GLOSARIO

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. Es conocida por sus siglas en inglés FAO (Food and Agriculture Organization).

Sobreexplotada. La extracción de los peces de una población es insostenible desde el punto de vista biológico, ya que su abundancia es inferior al rendimiento máximo sostenible.

Plena explotación. La extracción de los peces de una población es sostenible, pero su abundancia es igual o cercana al rendimiento máximo sostenible. Una tasa de explotación mayor podría llevar a la sobreexplotación de la pesquería, por lo tanto requieren un manejo eficaz para mantener el rendimiento máximo sostenible.

Subexplotada. La extracción de los peces de una población es sostenible desde el punto de vista biológico, ya la población tiene una biomasa mayor al máximo rendimiento sostenible. La presión pesquera sobre estas poblaciones ha sido relativamente baja, por lo que se podría aumentar su extracción en cierta medida.

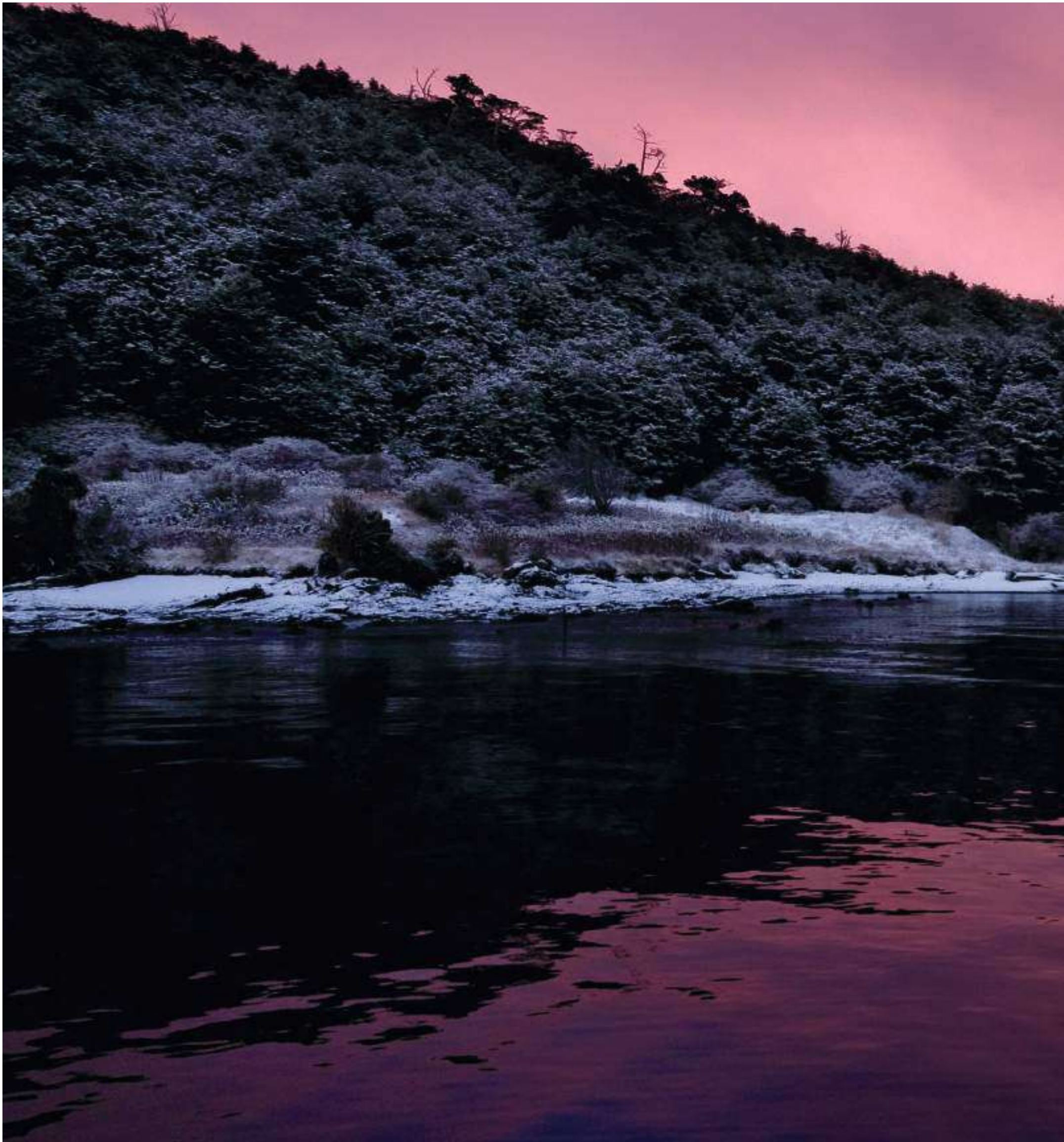
Colapsada. Debido a la sobreexplotación la abundancia de la población está muy por debajo del máximo rendimiento sostenible.

Rendimiento máximo sostenible. Es el nivel máximo de capturas que se pueden obtener de una población de peces de forma sostenible en el tiempo.

Especie objetivo. Especie a la cual va dirigida la actividad pesquera.

Reclutamiento. Incorporación de juveniles nacidos al stock.

Resiliencia. Capacidad de resistir o recuperarse de las perturbaciones y de adaptarse a futuras perturbaciones.





Amanecer en bosques de Bahía Águila, Estrecho de Magallanes, Chile. Foto Fernando Maldonado



Los polinizadores (ya sean insectos o vertebrados) pueden ser nodos clave en la creación de redes ecológicas ya que muchas especies dependen de la función que realizan en los ecosistemas. Foto de Ander Morea. CC BY-SA 3.0

Cambio global y su impacto sobre las redes de interacciones ecológicas

Anna Traveset, Miguel B. Araújo y Pablo A. Marquet

RESUMEN

La biodiversidad se organiza en redes de interacción que abarcan desde el nivel subcelular a la totalidad de la biosfera; la vida está conectada. Descifrar y entender los factores que dan cuenta de la estructura y dinámica de las redes ecológicas es particularmente problemático y representa un desafío pendiente. Durante la última década, sin embargo, se han llevado a cabo un gran número de estudios respecto de los factores que influyen en la estructura en red y su dinámica. Se ha establecido que la diversidad, abundancia y grado de especificidad de las especies que componen las redes, son atributos importantes que afectan la resiliencia de éstas ante cambios ambientales asociados al cambio global, tal como la invasión de especies exóticas, la fragmentación o degradación del hábitat y el calentamiento global. En particular, el cambio en el clima puede inducir cambios sutiles en los ritmos de actividad temporal de las especies o cambios fenológicos de las especies que podrían repercutir en la pérdida de conexiones o interacciones entre especies o en su reemplazo por otras, con consecuencias que en algunos casos podrían incluir el colapso de la red. El estudio de las redes de interacción es particularmente complejo y conlleva importantes desafíos. Entre éstos, tenemos el mejorar nuestra capacidad de predicción de cómo responderán las redes ecológicas ante los distintos motores de cambio global, la incorporación de múltiples interacciones dentro del análisis de redes (red multicapa o red multiplex) e integrar la estructura y funcionamiento de las redes ecológicas con el funcionamiento de los ecosistemas.

1. Aproximación de las redes ecológicas al estudio de la biodiversidad y el Cambio Global

La ecología es la ciencia que se preocupa de las interacciones entre las entidades vivas. Estas interacciones pueden ser de distinto signo para cada una de las entidades interactuantes, dependiendo de si obtienen un beneficio (signo positivo), un perjuicio (signo negativo), o ni uno ni lo otro (signo neutral). Cada tipo de interacción recibe un nombre determinado. Entre las más frecuentes encontramos los mutualismos - cuando ambas entidades que interactúan se benefician mutuamente-, la competencia -cuando se afectan negativamente-, o la depredación o parasitismo -cuando una se beneficia y la otra experimenta un efecto negativo-. Una manera de analizar estas relaciones entre entidades es a través de una aproximación de redes de interacción, la cual nos puede ayudar a entender mejor la ecología de comunidades diversas. Una red es un objeto matemático que permite representar las interacciones, estando compuesta por nodos (especies, generalmente) y de líneas (arcos) que conectan dichos nodos. Por ejemplo, en la Figura 1 se muestra una red de interacciones entre especies donde los nodos corresponden a especies y las líneas que las conectan señalan quién se come a quién; estas redes se conocen como redes tróficas. En general, los distintos organismos que constituyen los sistemas ecológicos interactúan entre sí conformando redes de interacción que subyacen a los servicios que éstos prestan para el desarrollo de la empresa humana sobre el planeta y cuyo análisis es fundamental para entender los impactos del cambio global (véase Capítulo 5).

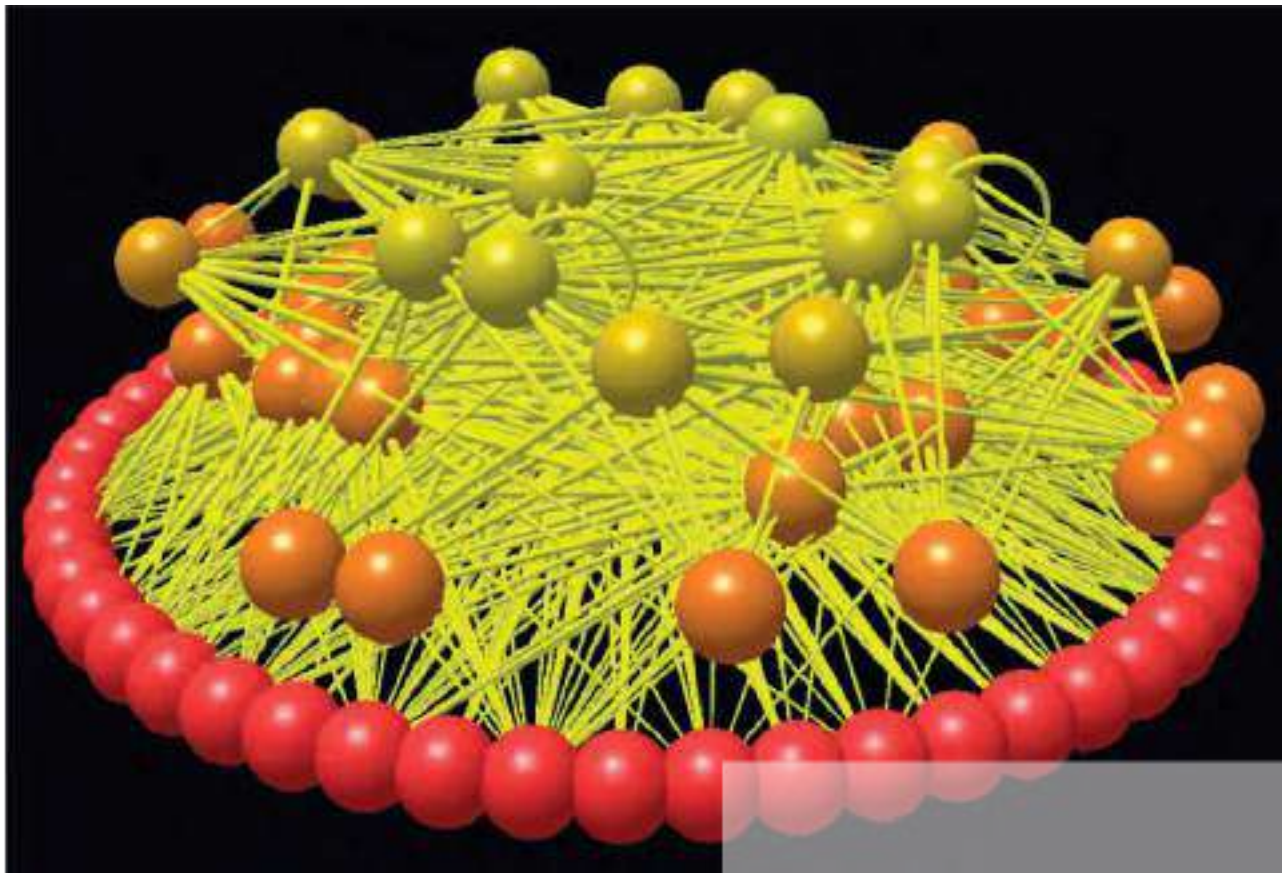


Figura 1. Ejemplo de red trófica en el intermareal de Chile Central (gentileza de Sergio Navarrete y Sonia Kefi). Las especies de productores se ven en color rojo en el nivel trófico más basal, los herbívoros en color naranja y los depredadores tope se visualizan en amarillo en la parte superior de la red. Las especies más conectadas se visualizan hacia el centro de la red y las menos conectadas hacia la periferia. Los loops corresponden a especies que presentan canibalismo. Imagen producida con FoodWeb3D, escrito por R.J. Williams y facilitado por el Pacific Ecoinformatics and Computational Ecology Lab.

El concepto de redes se ha ido impregnando progresivamente en las ciencias biológicas. La biodiversidad está sustentada en las redes de entidades que interactúan intercambiando materia, energía e información. Estas redes, que podemos llamar “redes de biodiversidad”, han sido fundamentales para el pensamiento biológico, al menos desde que Darwin¹ previó la complejidad de los sistemas ecológicos como una maraña (a la que llamó “entangled bank”) en la que las especies evolucionan de manera inter-dependiente. La resolución de dichas redes ha ido aumentando gracias a la taxonomía molecular y a que nuestra capacidad de análisis se ha visto favorecida de forma importante al poder aplicar métodos usados en la ciencia de las redes².

La arquitectura de las redes de biodiversidad representa el lienzo esencial sobre el cual necesitamos entender los efectos que los cambios globales tienen en la vida del planeta. Con todo, los enfoques actuales de la predicción de los efectos del cambio global en la biodiversidad se basan en el análisis de especies individuales, o conjuntos de especies similares, dificultando el tratamiento de la complejidad inherente a la arquitectura de la red de la biodiversidad. De hecho, los estudios teóricos y

empíricos indican que las predicciones del efecto del cambio global, y en particular de los cambios en el clima, sobre la biodiversidad basados en el análisis de especies individuales, son demasiado simples ya que no incluyen la complejidad que emana de la red de interacciones existentes entre ellas. Hace ya más de una década que se ha demostrado que la inclusión de las interacciones depredador-presa en los modelos puede cambiar sustancialmente las predicciones sobre la eficacia de reservas en comparación con las estimaciones hechas a partir de una sola especie^{3,4}. Este problema podría ser aún más importante en el contexto de la predicción de respuestas de las especies al cambio global.

La arquitectura de las redes de biodiversidad representa el lienzo esencial sobre el cual necesitamos entender los efectos que los cambios globales tienen en la vida del planeta

El hecho de considerar una perspectiva de redes de interacción de especies en el estudio del cambio global representa, sin embargo, un desafío formidable. La dinámica que rige las interacciones, que es de naturaleza

no-lineal por lo general, e incluye a muchas especies interconectadas, supone una gran complejidad a la hora de entender cómo la alteración de la abundancia o biomasa de una especie, como consecuencia del cambio climático o de una invasión, por ejemplo, puede afectar a otra especie⁵. A pesar de ello, a menos que consideremos dichas interacciones entre especies, no seremos capaces de hacer predicciones realistas de los efectos del cambio global sobre los sistemas ecológicos ni de desarrollar políticas apropiadas para mitigar dichos efectos. Predecir, por ejemplo, cómo el sacrificio de depredadores aumentará la abundancia de presas de importancia comercial resulta difícil, o incluso imposible, si se obvian las interacciones tróficas entre las especies⁶. Incluso los efectos más predecibles de especies que han sido bien estudiadas, como los depredadores clave, que tienen un efecto desproporcionado sobre la estructura de una comunidad en relación a su biomasa, pueden variar en el espacio y en el tiempo de forma importante⁷. Esta “indeterminación” y “dependencia del contexto” deben considerarse características intrínsecas de los sistemas ecológicos y, por tanto, el hecho de incorporarlas en los modelos, como un reto a abordar. Por otro lado, existe evidencia creciente de la conexión entre estructura de las redes y funcionamiento de los ecosistemas; no obstante, y como veremos más adelante, las interpretaciones de dicha estructura, de su estabilidad y de su funcionamiento pueden variar de forma importante al considerar escalas más amplias como las **meta-redes** o las **redes multicapa**.

Los cambios provocados por las actividades humanas pueden resultar en cambios en la abundancia, la fenología, el comportamiento y la coexistencia de especies. Por lo tanto, la ‘sensibilidad’ de las interacciones entre especies depende de su capacidad para hacer frente a los cambios que pueden perturbar y alterar la estructura y la dinámica de las redes ecológicas, aunque no impliquen necesariamente la extinción de especies. El estudio de cómo las redes de interacción responden actualmente a gradientes ambientales (naturales o inducidos por las actividades humanas), combinado con información sobre relaciones filogenéticas, caracteres de las especies y capacidad de **recableado (reordenamiento) de**

interacciones (interaction rewiring), nos ayudará a poder predecir con mayor precisión cómo van a responder a futuros cambios ambientales⁸.

El objetivo de este capítulo es mostrar la importancia de una aproximación de redes para comprender los efectos del cambio global sobre la biodiversidad, con especial énfasis en los retos que este tipo de investigación comporta en términos de predicción de impactos y para la generación de políticas de adaptación y mitigación. Nos centraremos principalmente en los efectos del cambio climático, de la pérdida y fragmentación del hábitat, y de las invasiones biológicas, señalando las características topológicas de las redes que las hacen menos vulnerables y/o más resilientes a dichos motores de cambio global, e identificaremos los retos principales que quedan todavía por abordar, en el marco de las redes complejas, para una buena comprensión de las consecuencias del cambio global sobre la biodiversidad del planeta.

2. Efecto del cambio climático en las redes ecológicas

La mayoría de estudios sobre los efectos del cambio climático en la biodiversidad se han enfocado a nivel de especie en vez de en las complejas comunidades de especies interactuantes⁹. La razón es doble. Por un lado, existe una evidencia circunstancial de que las especies han respondido de forma individual a los cambios climáticos pasados¹⁰. En otras palabras, se adaptaron como pudieron al cambio climático independientemente de lo que hicieron otras especies. Por otro lado, se puede decir que el modelado de comunidades es más difícil que el de especies individuales¹¹, especialmente si uno empieza con la asunción de que cada especie se comporta de forma individual e independiente dentro de la comunidad. Si el individualismo fuera la norma y las reglas del ensamblaje de especies en las comunidades fueran débiles o inexistentes, entonces modelar las comunidades frente al cambio climático sería análogo a sumar las respuestas individuales de múltiples especies en las comunidades. La pregunta crítica, desde luego, es

si el individualismo es la caracterización más precisa de cómo funcionan las comunidades. Ciertamente, las especies persiguen maximizar su adecuación biológica o fitness, y sus interacciones con otras especies son a menudo débiles¹² y asimétricas¹³. Es decir, las interacciones entre pares de especies son raramente obligatorias. Una especie puede interactuar con otra en un sitio y momento en particular, y cambiar a interactuar con otra en un contexto distinto. Además, cuando una especie tiene un grado moderado de dependencia de otra especie, es común que la otra especie tenga una baja dependencia de la primera. La predominancia de interacciones débiles y asimétricas entre especies puede dar lugar a la percepción de que el individualismo es lo que dicta las respuestas de las especies a los cambios ambientales. Sin embargo, las extinciones en cascada que tienen lugar cuando especies claves en las comunidades desaparecen, sirven como aviso de que el individualismo podría no evitar la existencia de interacciones bióticas clave para la persistencia de comunidades enteras. Además, hay casos bien conocidos de interacciones fuertes, aunque asimétricas, que hacen que las especies sean altamente dependientes del éxito de otras especies. Un ejemplo muy ilustrativo es el del lince ibérico cuya dieta consta casi exclusivamente (más de un 90%) de otra especie: el conejo. En esos casos, los efectos del cambio climático en esas especies focales estarán inevitablemente ligados a los efectos del cambio climático en las especies interactuantes¹⁴. Esto es así para las interacciones antagonistas, como las de depredador-presa¹⁵, pero también para las interacciones de facilitación y mutualistas¹⁶.

Las especies raras, en general, tienen un mayor riesgo de extinción que las más abundantes, y algunos estudios de redes han mostrado que son las primeras en desaparecer en ambientes acuáticos sujetos a sequías¹⁷, así como también en hábitats terrestres en proceso de fragmentación¹⁸. El tamaño corporal es otro factor que influye de forma importante en la probabilidad de extinción de una especie, en parte debido a que este carácter está positivamente correlacionado con el rango de distribución y negativamente asociado a la tasa reproductiva y tamaño poblacional¹⁹. Por ello, una elevada temperatura o la

pérdida y fragmentación de hábitat suele seleccionar a favor de tamaños corporales menores. Este efecto del tamaño corporal, además, puede ser mayor en niveles tróficos altos y, dado que muestra ser muy importante determinando el flujo de biomasa, así como también qué especies interactúan en las redes tróficas, la selección de unas determinadas clases de tamaño podría ser un mecanismo común mediante el cual los cambios ambientales afectan las redes ecológicas⁸. El tamaño corporal, además, puede influenciar en la fuerza de interacción, es decir, en las tasas de consumo en las redes tróficas, y dicha influencia puede depender de las condiciones ambientales locales.

Los cambios ambientales pueden también ejercer selección sobre algunas especies en función de su papel en la red de interacciones. Así, por ejemplo, las especies especialistas (con pocas parejas interactuantes) y sus interacciones, y aquellas especies que contribuyen de forma importante al **anidamiento** ('nestedness'; patrón por el cual las especies especialistas interactúan con subconjuntos de las especies con las que interactúan las generalistas) pueden tener una mayor probabilidad de extinción²⁰, causando un aumento de la **conectancia** (proporción de enlaces relativos a todos los posibles); una red de menor tamaño (es decir, con menos especies) y con menos especialistas tendría un mayor promedio de interacciones por especie y, por tanto, una mayor conectancia.

Mediante experimentos que simulan un aumento de temperatura, se ha demostrado que la composición de especies de la comunidad puede verse muy alterada y que los ratios de biomasa consumidor:productor tienden a aumentar, tanto en sistemas acuáticos como terrestres. Así, a lo largo de un gradiente natural de mayor a menor temperatura de los ríos en Islandia, se ha observado un cambio de composición de especies, así como la desaparición de las interacciones con el depredador 'top', a la vez que una disminución de las tasas de distintos procesos ecosistémicos²¹. La temperatura está también relacionada con la disponibilidad de nutrientes y con las tasas metabólicas, y éstas, a su vez, con el tamaño corporal, el cual influye de forma compleja en las interacciones tróficas. Los niveles tróficos altos pueden ser,

en general, más vulnerables a los cambios ambientales, conduciendo a redes más pesadas en niveles tróficos intermedios, como el de los herbívoros, o incluso en los niveles más basales¹⁷.

En un escenario de cambio climático, un aumento de temperatura puede alterar la composición de especies de una comunidad, las tasas metabólicas –y por tanto las frecuencias de interacción entre especies–, además de su solapamiento fenológico y espacial

En un escenario de cambio climático, las redes mutualistas muestran ser más sensibles a la extinción de plantas que a las de animales, y se requiere un alto potencial de recableado para que las redes se estabilicen frente a una cascada de extinciones²². Sin embargo, a pesar de mantener la estructura de la red, dicho recableado puede enmascarar cambios más sutiles pero importantes en la dinámica de la red. Así, por ejemplo, experimentos de sequía en sistemas acuáticos han mostrado un recableado en la red trófica con un aumento del recambio de especies de pequeños consumidores, provocando un colapso de la red trófica debido a la pérdida de interacciones entre depredadores.

El cambio climático puede también alterar el solapamiento fenológico o espacial de las especies interactuantes. La comprensión de cómo los cambios fenológicos inducidos por el clima pueden alterar las redes de interacción entre especies ha recibido especial atención, aunque todavía son pocos los estudios a nivel de comunidad comparados con los realizados con especies determinadas. Mediante simulaciones, se ha visto que incluso pequeños cambios en la fenología podrían dejar muchas plantas y polinizadores sin poder solaparse en el tiempo²³. Sin embargo, las fenologías de plantas y de polinizadores parecen responder en paralelo a cambios en el clima²⁴ y, por tanto, esos cambios previstos en las simulaciones podrían ser más débiles que los cambios reales. Las respuestas fenológicas a un aumento de temperatura varían

mucho entre especies y, hasta la fecha, sabemos todavía poco sobre cómo de prevalente es la interrupción en las interacciones planta-polinizador debido al cambio climático y qué consecuencias tiene para la producción de semillas y las poblaciones de polinizadores. Algunos estudios han documentado que la asincronía fenológica en el proceso de polinización es rara en la naturaleza²⁵, mientras que otros han encontrado que altos niveles de diversidad pueden mantener la sincronía a nivel de comunidad al amortiguarse las respuestas fenológicas diferenciales entre especies²⁶. En cuanto a las implicaciones ecológicas y evolutivas de las interrupciones, la información es todavía escasa, aunque algunos estudios están actualmente avanzando en este campo²⁷. Aunque se ha predicho que las mayores interrupciones mutualistas ocurren en las especies con nichos estrechos, algunos estudios han mostrado que especies especialistas en el uso de los recursos son igualmente vulnerables a las asincronías que las generalistas. Al menos en la región mediterránea, las asincronías en la fenología pueden verse más influenciadas por la aridez que por la misma temperatura, y por tanto la primera podría ser un carácter climático clave para hacer mejores predicciones en esta región²⁸.

3. Efecto de la pérdida y fragmentación de hábitat en las redes ecológicas

Los estudios a nivel de comunidad enfocados a evaluar el efecto de la pérdida y fragmentación de hábitat o cambios en el uso de suelo, son todavía escasos, y por tanto tenemos poca evidencia empírica de las consecuencias finales de dicho efecto sobre el funcionamiento ecosistémico. Se conoce desde hace tiempo, sin embargo, que una reducción en la calidad del hábitat y heterogeneidad del paisaje causan la pérdida de especies y promueven cambios en el patrón de interacción entre especies, es decir, en la estructura de las redes²⁹. Gran parte de estos estudios se han focalizado en las redes de polinización³⁰. Sabemos hoy que al reducir la disponibilidad y diversidad de polinizadores debido a una disminución de los recursos florales y de zonas de nidificación, una alteración del hábitat puede influir

sobre los niveles de polinización cruzada y, en última instancia, en la producción de frutos y semillas. Asimismo, la variación en las densidades de plantas de la misma especie como consecuencia de perturbaciones o pastoreo, puede afectar, a distintas escalas, al éxito reproductivo al cambiar la conectividad entre individuos mediada por polinizadores³¹. Esto indica que, al alterar las interacciones interespecíficas entre plantas a nivel de comunidad, la perturbación del hábitat puede tener efectos en cascada y modificar el flujo de genes entre distintos niveles de organización, potencialmente incluso conduciendo a cambios evolutivos³².

Las comunidades que encontramos dentro de un paisaje fragmentado no son entidades independientes si no que están interconectadas e influenciadas por una dinámica de colonizaciones y extinciones dentro de lo que se ha denominado como **meta-red**³³. Es necesario pues estudiar redes ecológicas que enlacen distintos tipos de hábitats, por ejemplo naturales con perturbados o con productivos (dedicados a la agricultura, por ejemplo), y determinar cómo se mezclan en esas interfaces y si es posible distinguirlas según esos tipos de hábitat delimitados por los humanos (Figura 2). Estudios recientes muestran que las redes en dichas intersecciones están más conectadas de lo que se esperaría por azar debido a una mayor presencia de especies generalistas. Las especies móviles son también muy importantes en estas zonas adyacentes ya que actúan como conectoras en esos paisajes fragmentados.

Como se ha comentado previamente, las interacciones raras y especializadas han mostrado ser las primeras en desaparecer después de una reducción o alteración del hábitat, y se observa por tanto un aumento en la frecuencia de especies generalistas³¹. También se ha detectado una reducción del nivel de anidamiento en hábitats perturbados, lo que ha llevado a predecir un descenso en el número de especies coexistentes y en la robustez y resiliencia de las redes a futuras perturbaciones^{34,35}. Además, la pérdida de especies e interacciones en una red perturbada puede también conducir a una mayor **modularidad** (Figura 3), es decir a la formación de compartimentos aislados dentro de la red y donde las especies están más conectadas

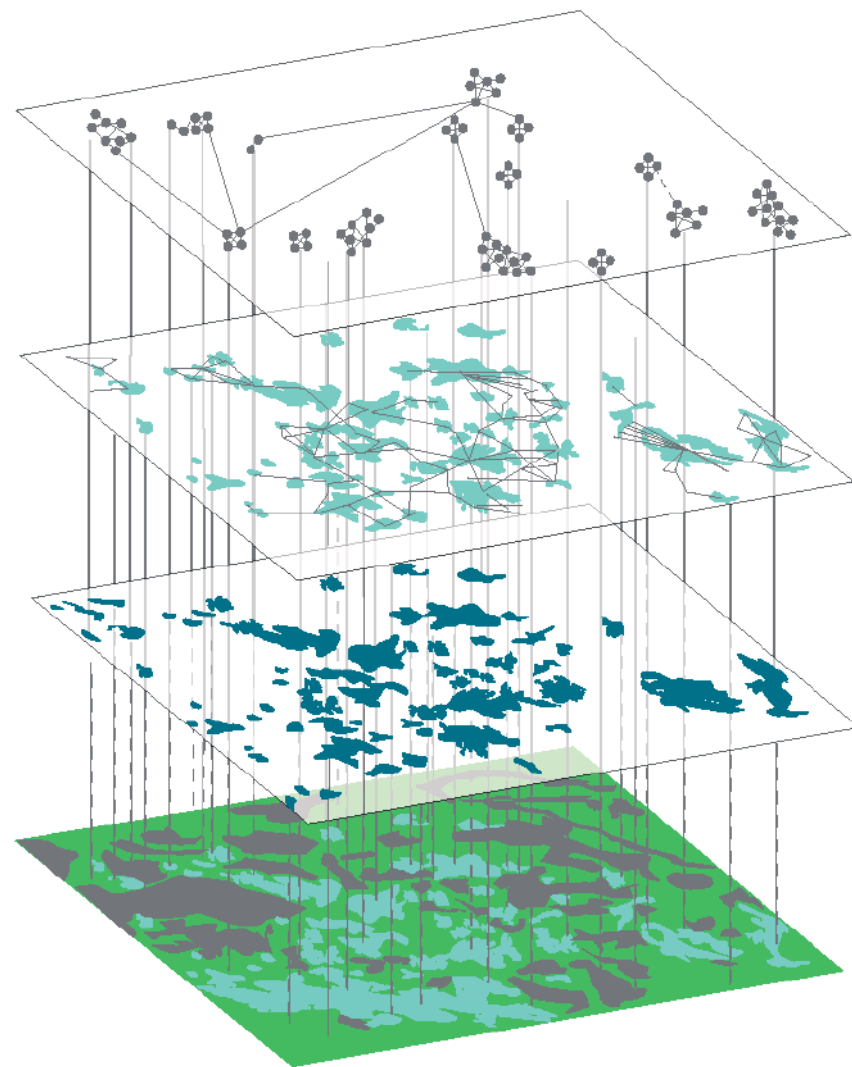


Figura 2. Ejemplo de meta-red y de red multiplex en un paisaje fragmentado en el área de Estocolmo. Modificado de <http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art28>

entre sí que con otras especies de la red. Dichos módulos corren un mayor riesgo de desaparecer después de futuras perturbaciones que si las especies están conectadas en una red cohesiva. Distintos modelos han mostrado que la distribución del número de interacciones se vuelve más sesgada al pasar de un sistema prístino a uno perturbado, y que las redes mutualistas podrían colapsar a partir de unos niveles críticos de destrucción de hábitat³⁵.

La degradación del hábitat puede también causar una homogenización de las redes al promover una mayor diversidad de interacciones aunque un menor recambio de enlaces en zonas perturbadas comparadas con las no perturbadas³⁶. Además, el rol funcional de una especie en particular puede cambiar a lo largo de un gradiente de perturbación. Así, por ejemplo, una especie puede actuar

como “especie hub” en una zona y como especialista (estando en la periferia de la red) en otra zona. Las especies hubs de los módulos y de las redes, junto con las especies conectoras (especies que enlazan distintos módulos), son consideradas como especies clave en el mantenimiento de la estructura de la red y, por tanto, su desaparición debido a una perturbación tiene los mayores efectos e incluso puede conducir al colapso de la red^{35,37}. En todas las redes, hay unas especies más sensibles que otras a las perturbaciones. Diversos estudios han mostrado, por ejemplo, que las abejas sociales son más sensibles a cambios en la distribución de los hábitats de forrajeo y nidificación en el paisaje, mientras que las abejas solitarias pueden estar más afectadas por la destrucción del hábitat ya que están más especializadas en recursos tróficos o de nidificación. Precisamente, el hecho de que cada grupo funcional responda de forma distinta a las perturbaciones dificulta poder predecir las consecuencias finales de la pérdida de hábitat en la composición y funcionamiento de la comunidad.

La estructura del hábitat puede influir sobre la probabilidad de interacción entre especies (en gran parte determinada por la abundancia de las mismas³⁸) y en la eficiencia en la búsqueda de recursos u otras especies (sea la presa, o la planta de la que alimentarse, por ejemplo), sin que sean necesarios cambios en la composición de especies. Así, hábitats poco complejos, como pueden ser áreas urbanas y campos de cultivo, pueden aumentar la eficiencia en la búsqueda por parte de los depredadores, incrementando la conectancia de la red³⁹ y causando aumentos desproporcionados en las tasas de ataque de consumidores sobre sus recursos preferidos, lo que hace disminuir la homogeneidad en la frecuencia de interacción (**interaction evenness**)²⁹. La eficiencia en los encuentros entre especies puede también verse modificada por los gradientes de pluviosidad, tal y como se ha descrito en ambientes acuáticos en los que las presas varían su capacidad de detectar a los depredadores dependiendo de la lluvia⁴⁰.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la variabilidad en las interacciones de las redes es grande tanto en el espacio como en el tiempo. El recambio de interacciones



Figura 3. Ejemplo de una red modular (consistente en cuatro módulos indicados por distinto color). Cada grupo de nodos (especies) muestra mayor frecuencia de interacción con las de su respectivo módulo. Esta estructura ofrece resistencia a algunos tipos de perturbaciones, por ejemplo los que provocan extinciones en cascada

puede ser estocástico o determinado por los cambios estacionales o fenológicos de la presencia y abundancia de las distintas especies. De hecho, la duración de la fenología puede ser tan relevante como la abundancia en determinar la estructura de la red⁴¹.

4. Efecto de las invasiones de especies en las redes ecológicas

Al igual que en el caso de los anteriores motores de cambio global tratados, una mejor comprensión de cómo las interacciones entre especies influyen y/o están influenciados por las invasiones biológicas nos obliga a ir más allá del estudio de parejas de especies hacia un enfoque de red que abarca comunidades enteras. Específicamente, la teoría de redes nos ayuda a evaluar cómo se incorporan nuevas especies en la comunidad y cómo la comunidad responde a esas nuevas adiciones⁴². La mayoría de los estudios que siguen este enfoque se han centrado en interacciones de polinización⁴³, algunas en interacciones en la dispersión de semillas⁴⁴, e incluso otras

han explorado la integración de especies introducidas en redes planta-hongos⁴⁵. Además, también existen estudios que han modelado la invasión de redes tróficas para entender cómo funciona el ensamblaje de comunidades. Como norma general, las redes menos conectadas con pocas especies se consideran más fáciles de invadir, mientras que una especie tiene más dificultad de invadir una red trófica si su nicho ecológico es parecido al de las especies existentes en la comunidad. Sin embargo, se han encontrado bastantes excepciones a esta norma, y por tanto, predecir cómo se relaciona la resistencia biótica con medidas aproximadas de la arquitectura de la red no es tarea fácil.

Por norma general, las redes menos conectadas con pocas especies suelen ser más fáciles de invadir, mientras que una especie tiene más dificultad de invadir una red trófica si su nicho ecológico es parecido al de las especies existentes en la comunidad

Las redes mutualistas, en particular, suelen consistir en un núcleo de especies nativas generalistas (enlazadas con un alto número de especies) que facilitan la incorporación de especies exóticas⁴⁶ (Figura 4). A su vez, las plantas invasoras más exitosas polinizadas o dispersadas por animales tienden a ser muy generalistas, actuando a menudo como 'hubs' de la red. Los mutualistas exóticos tienen, en promedio, más conexiones que los nativos de la comunidad, lo que sugiere que tales niveles de generalización podrían estimular su propagación al aumentar su ventaja competitiva sobre los nativos.

La historia evolutiva de las especies que forman parte de las redes ecológicas, especialmente las mutualistas, puede tener un efecto sobre la estructura de la red y se manifiesta en que especies cercanamente emparentadas (i.e. más cercanas en un árbol filogenético) tiendan a tener atributos parecidos, como por ejemplo interactuar con un número o tipo similar de especies^{47,48}. Este efecto filogenético sobre la estructura de la red puede ser

importante para determinar la vulnerabilidad a especies invasoras específicas que pueden estar más o menos emparentadas con las especies nativas⁴⁹. La relación filogenética de un invasor y los miembros de la comunidad nativa proporciona, por tanto, una herramienta predictiva para la invasibilidad, así como del impacto en la red. Esta es una atractiva área de investigación, siendo necesarios más análisis de señales filogenéticas en redes invadidas.

La mayor parte de la evidencia disponible no muestra cambios en la conectancia entre redes invadidas y no invadidas, lo que implica que cualquier influencia en el tamaño de la red es compensada por un aumento en las interacciones debido a que las invasoras son generalmente generalistas⁵⁰. Por otro lado, las especies exóticas a menudo promueven recableados de los enlaces dentro de las redes. Los enlaces suelen ser transferidos desde las especies nativas generalistas hasta las invasoras altamente conectadas (**supergeneralistas**), actuando como hubs, modificando así toda la topología de la red. A medida que avanza la invasión, tales **supergeneralistas** se convierten en nodos centrales^{46,51}, desempeñando un papel fundamental en la conformación de la estructura de la red. Al ser especies generalistas y/o enlazarse con especies generalistas, las exóticas también pueden aumentar el anidamiento de la red⁵², lo que podría proporcionar estabilidad a las redes. Del mismo modo, las especies exóticas pueden mejorar la cohesión de la red si juegan un papel importante conectando módulos⁵³, con efectos potenciales sobre el funcionamiento de la red, los regímenes de selección recíproca y la cascada de perturbaciones a lo largo de la red.

Debido a que las interacciones de baja dependencia recíproca son las más robustas frente a las perturbaciones, las especies de una red invadida en su conjunto pueden ser resistentes a las perturbaciones, aumentando así la probabilidad de permanencia y supervivencia de una invasora en la red. De hecho, algunos estudios muestran que algunas especies invasoras son importantes para la persistencia de la red⁵⁴, lo que implica que las redes dominadas por invasoras podrían dificultar la restauración de las interacciones entre las nativas. Este efecto, unido

a una interacción preferencial entre especies invasoras, podría causar un bucle de retroalimentación positiva (“**invasional meltdown**= colapso invasional”) que precipitaría un impacto aún mayor de la invasión en la comunidad nativa. Por tanto, el impacto de una invasión en la estructura de la red depende de forma importante de su rol en la red, y su impacto es mayor cuanto más generalista es. El rol de las especies invasoras ha mostrado ser bastante constante en el espacio y en el tiempo⁵⁵, y estar bastante correlacionado con el rol que juegan en su rango nativo de distribución⁵⁶, lo cual puede facilitar la predicción del impacto de una invasora sobre una comunidad nativa.

En cuanto al mantenimiento de las funciones del ecosistema, el que la especie sea exótica invasora o nativa puede ser irrelevante mientras se mantenga la diversidad de proveedores de servicios. En cuanto a la aptitud de las especies (en el caso de las plantas, por ejemplo, medida como éxito en la reproducción, en la dispersión o en el crecimiento de las plantas), la integración de especies exóticas en redes ecológicas proporciona interesantes experimentos naturales. No es fácil predecir en qué casos las especies exóticas dominarán las interacciones dentro de las redes, hasta qué punto alterarán la capacidad de las nativas para interactuar con sus parejas y las consecuencias demográficas que la alteración tendrá sobre ellas.

De entrada, una mayor diversidad de polinizadores exóticos, así como una mayor tasa de sus visitas a las plantas nativas, pueden implicar un beneficio de la invasión. Sin embargo, este beneficio puede verse contrarrestado si dichas invasoras usurpan las interacciones de las especies nativas más especializadas, de manera que las redes de transporte de polen o de semillas estén dominadas por el polen invasor o por semillas invasoras. Además, el impacto de las invasoras puede depender de la escala espacial y temporal de estudio. Así por ejemplo, a escalas muy pequeñas (locales), especies vegetales invasoras pueden competir con nativas por polinizadores/dispersores, mientras que a escalas mayores (regionales o temporales), dichas invasoras pueden atraer a los mutualistas y aumentar su disponibilidad local,

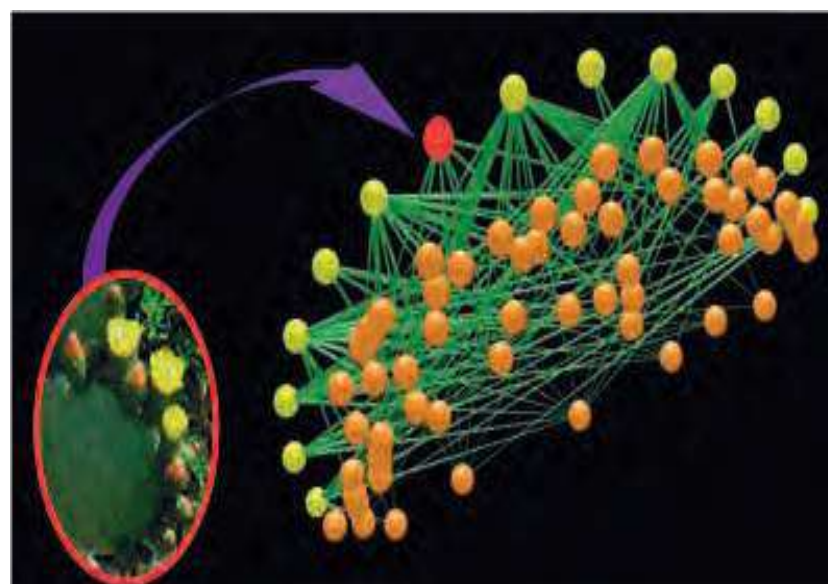


Figura 4. Red de polinización de una comunidad en la isla de Menorca (Islas Baleares). La red contiene 14 especies de plantas (nodos amarillos) y 54 de insectos (nodos naranjas) que visitan sus flores para alimentarse de polen y/o néctar. Se indica en color rojo la especie invasora *Opuntia maxima*. Tomado de la tesis doctoral de B. Padrón (2011)

aportando así un beneficio a las nativas⁵⁷. Con el tiempo, las especies invasoras abundantes podrían sustentar mayores poblaciones de mutualistas de tal manera que las nativas se beneficiaran de estar en su vecindario, aunque ese beneficio tendría lugar sólo si los mutualistas no se especializaran en la especie invasora. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que una generalización a escala de especie no tiene por qué corresponderse con la generalización a nivel de individuo. De hecho, a nivel individual, puede ser más ventajoso para una planta nativa, por ejemplo, que los visitantes exóticos sean especialistas y no transfieran polen de otras especies que podría interferir en la función de polinización⁵⁸. Esta dicotomía entre el generalismo a nivel de especie versus individual puede ser bastante común, aunque no se ha evaluado suficientemente, y concuerda con las grandes diferencias observadas entre el promedio del **grado** o **degree** (número de parejas interactuantes) en periodos cortos y el **degree total** de una especie⁵⁹. Dicha dicotomía también puede explicar, por ejemplo, por qué plantas que

aun compartiendo polinizadores con muchas otras especies reciben altas tasas de deposición de polen conoespecífico en sus estigmas. Sin duda, valdrá la pena explorar estas diferencias -dependientes de la escala- en los roles de las especies en las redes y la importancia en su dinámica en futuros estudios. Hay que tener en cuenta, además, que la estructura de las redes de deposición de polen podría diferir de la de las redes de visita o de las de transporte de polen, por ejemplo, mostrando una mayor especialización⁶⁰.

En general, son necesarios más estudios a nivel comunitario que comparen la función ecológica de las especies exóticas con la de las nativas, ya que la mayoría de la información que tenemos ahora es a nivel de especie. Además, la evidencia empírica que tenemos sobre las respuestas evolutivas de las especies nativas frente a la dominación de una invasora es todavía relativamente escasa, aunque probablemente sean muy importantes.

5. Consecuencias del cambio global en las interacciones coevolutivas

Las redes ecológicas comprenden una mezcla de interacciones entre especies que han evolucionado por un largo periodo de tiempo en el cual ha tenido lugar un acoplamiento de rasgos (trait matching)⁶¹ e interacciones que tienen lugar de forma oportunista, con una quizás menor probabilidad de efectos sobre el fitness a largo plazo⁶². Debido al cambio global, la disrupción de las redes ecológicas, el reordenamiento de interacciones y la alteración de las fuerzas de interacción pueden tener múltiples implicaciones para la adecuación biológica o fitness de las especies y modificar, en última instancia, los procesos coevolutivos.

Los cambios ambientales pueden alterar la prevalencia de las interacciones que contribuyen a los patrones de congruencia filogenética o el grado de correspondencia entre los árboles filogenéticos de predadores y presas en una red trófica o de plantas y polinizadores en una red mutualista. Por ejemplo, la pérdida “no al azar” de interacciones entre especialistas con la reducción del área

resulta en una reducción de la congruencia filogenética. En el caso de las especies invasoras, éstas pueden ‘usurpar’ especies nativas especialistas de sus parejas nativas con las que han evolucionado, reduciendo también la congruencia filogenética. Por el contrario, los cambios ambientales pueden reforzar dicha congruencia mediante la selección en contra de interacciones oportunistas. Un estrés ambiental podría reducir el nicho trófico de una especie, por ejemplo, haciendo que sólo usara recursos a los cuales está mejor adaptada. Algunos estudios han documentado una congruencia filogenética mayor en redes parásito-hospedador con un aumento de la temperatura y en cultivos frente a bosques nativos, aunque los resultados son todavía contradictorios y, por tanto, se desconoce la relevancia de este mecanismo.

Por tanto, los patrones de congruencia filogenética pueden variar dependiendo del factor ambiental específico y los límites que imponga, del grado de generalismo de las especies implicadas, de los beneficios relativos de las interacciones coevolutivas frente a las facultativas, y de la relativa rareza de especies involucradas en interacciones coevolutivas. Esta investigación está todavía en su infancia, y la importancia de la coevolución tanto en la estructura de las redes como determinando su vulnerabilidad⁴⁸ es, sin duda, un importante campo de investigación futura.

6. Predicciones sobre cambios en las redes debidos al cambio global. ¿Dónde estamos?

Predecir cómo van a responder las redes ecológicas a los distintos motores de cambio global muestra ser un gran reto. Conocer la composición de especies y el potencial de interacción entre pares de especies es insuficiente para predecir la topología de la red. Cuando los análisis se limitan a predecir las interacciones potenciales, las abundancias de las dos especies potencialmente interactuantes pueden parcialmente explicar propiedades estructurales como el anidamiento o la asimetría en las interacciones³⁸. Incluso a nivel de especie, la abundancia puede contribuir a predecir la fuerza de interacción y el

número de enlaces, y este efecto puede separarse de la influencia de los rasgos de las especies, como por ejemplo, la fenología⁴¹.

Estudios recientes intentan predecir la presencia de interacciones mediante modelos estocásticos en los que intervienen una serie de filtros que incluyen rasgos disponibles, relaciones filogenéticas, efectos neutrales de la abundancia de las especies, comportamiento de las especies, etc. Cualquier conocimiento sobre estos filtros contribuirá a mejorar la habilidad de predicción de los modelos sobre cómo afectarán distintos tipos de perturbaciones a las redes de interacción.

Otro gran desafío en el estudio de las redes es el desvelar la relación entre su estructura y el funcionamiento ecosistémico. Una de las métricas que inicialmente se usaron para ello fue la de conectancia, aunque diversos estudios han mostrado que no es una métrica adecuada ya que puede aumentar, disminuir o incluso no variar con la tasa de funcionamiento (por ejemplo, la tasa de ataque en redes tróficas huésped-parasitoide). La complementariedad de recursos entre consumidores es una métrica que parece ser mucho más útil⁶³. Otra línea interesante de investigación es la de ligar los rasgos de las especies y la diversidad funcional con los roles en la red⁶⁴. Además, la combinación de dichos rasgos (relacionando dispersión, respuestas ambientales, interacciones y funcionamiento) con procesos espaciales y patrones de interacción (relacionando redundancia con complementariedad de nicho) será útil para discernir los mecanismos por los cuales las comunidades afectan el funcionamiento a escalas de paisaje.

Finalmente, es importante tener en cuenta que las comunidades contienen tanto interacciones mutualistas como antagonistas y la mezcla de ambas puede generar diferentes conclusiones en cuanto a la influencia de la arquitectura sobre la estabilidad de la comunidad^{65,66}. Estos distintos tipos de redes comparten especies y crean una red de redes⁶⁷, lo que se ha denominado red multicapa o red multiplex⁶⁸ por la cual pueden propagarse las perturbaciones. Por tanto, a la hora de interpretar

patrones de las redes, es necesario considerar que los enlaces entre los distintos tipos de red podrían estar afectando su estabilidad, resiliencia al cambio ambiental, y funcionamiento ecosistémico a través de los gradientes ambientales. Estructuras que promueven estabilidad en un tipo de red (por ejemplo, anidamiento en una red mutualista, o modularidad en una antagonista) dejan de hacerlo cuando se combinan ambos tipos de red. El trabajo que queda por hacer para comprender bien cómo funcionan las meta-redes y las redes multiplex y cómo las perturbaciones se propagan a través de ellas es enorme, a la vez que apasionante.

7. Conclusiones

En este capítulo hemos visto cómo la aproximación de las redes de interacción nos ayuda considerablemente a comprender las respuestas de las comunidades a los cambios antropogénicos. Se trata de una aproximación relativamente reciente a los estudios de biodiversidad y, por tanto, se enfrenta todavía a muchos retos metodológicos y de análisis, aunque se está avanzando de forma muy rápida en el estudio de los factores asociados al ‘recambio o turnover de interacciones’, de las interacciones multitróficas, e incorporando la escala espacial y temporal en la estructura y dinámica de las interacciones. Dichos avances permitirán, sin duda alguna, hacer cada vez predicciones más realistas y precisas de cómo pueden verse alteradas esas interacciones frente al cambio global y de su resiliencia. Hemos visto también cómo los caracteres de las especies juegan una papel muy importante mediando los efectos de la composición de especies en la arquitectura de la red y relacionándola con el funcionamiento ecosistémico. Por ejemplo, la mayor probabilidad de extinción de especialistas y el mayor grado de generalismo de las invasoras implican que tanto las extinciones como las invasiones probablemente generan redes con más interacciones por especie y una menor complementariedad trófica. La abundancia (tamaños poblaciones) de las especies también puede responder de formas distintas a las perturbaciones, y estas diferencias

pueden propagarse a través de la red influyendo sobre su arquitectura. Dichas abundancias afectan a la probabilidad de encuentro de las especies, lo cual, conjuntamente con las eficiencias en la búsqueda de pareja interactuante, puede influir sobre qué interacciones potenciales pueden darse en la red. Además, hemos indicado que los cambios ambientales pueden debilitar o reforzar los patrones de congruencia filogenética, dependiendo de la generalización de las especies, de la frecuencia de especies involucradas en interacciones coevolutivas, y de los beneficios relativos de esas interacciones versus las facultativas. Por último, hemos señalado el gran desafío que representa discernir la relación entre la estructura de las redes y el funcionamiento ecosistémico, aplicando además una aproximación de meta-redes y de redes multicapa, una línea de investigación reciente y que promete ser muy interesante.

REFERENCIAS CITADAS

- Darwin, C. The origin of species by means of natural selection: or, the preservation of favored races in the struggle for life (1859).
- Newman, M. Networks: an introduction. Oxford University Press (2010).
- Micheli, F., Amarasekare, P., Bascompte, J., & Gerber, L. R. Including species interactions in the design and evaluation of marine reserves: some insights from a predator-prey model. *Bulletin of Marine Science* 74, 653-669 (2004).
- Baskett, M. L., Micheli, F., & Levin, S. A. Designing marine reserves for interacting species: insights from theory. *Biological Conservation* 137, 163-179 (2007).
- Pascual, M., & Dunne, J. A. (Eds.). *Ecological networks: linking structure to dynamics in food webs*. Oxford University Press (2006).
- Yodzis, P. Diffuse effects in food webs. *Ecology* 81, 261-266 (2000).
- Power, M. E., Tilman, D., Estes, J. A., Menge, B. A., Bond, W. J., Mills, L. S., Daily, G., Castilla, J.C., Lubchenco, J. & Paine, R. T. Challenges in the quest for keystones. *BioScience* 46, 609-620 (1996).
- Tylianakis, J. M., & Morris, R. J. Ecological networks across environmental gradients. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 48, 25-48 (2017).
- Araújo, M.B. & Luoto, M. The importance of biotic interactions for modelling species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography* 16, 743-753 (2007).
- Stewart, J.R., Lister, A.M., Barnes, I. & Dalén, L. Refugia revisited: individualistic responses of species in space and time. *Proceedings of the Royal Society, Biological Sciences* 277, 661-671 (2010).
- Baselga, A. & Araújo, M.B. Individualistic vs. community modelling of species distributions under climate change. *Ecography* 32, 55-65 (2009).
- Barrat, A., Barthélemy, M., Pastor-Satorras, R. & Vespignani, A. The architecture of complex weighted networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101, 3747-3752 (2004).
- Bascompte, J., Jordano, P. & Olesen, J.M. Asymmetric coevolutionary networks facilitate biodiversity maintenance. *Science*, 312, 431-433 (2006).
- Fordham, D.A., Akcakaya, H.R., Brook, B.W., Rodriguez, A., Alves, P.C., Civantos, E., Trivino, M., Watts, M.J. & Araujo, M.B. Adapted conservation measures are required to save the Iberian lynx in a changing climate. *Nature Climate Change* 3, 899-903 (2013).
- Wilmers, C.C. & Getz, W.M. Gray wolves as climate change buffers in Yellowstone. *PLoS Biology* 3, e92 (2005).
- Araújo, M.B. & Rozenfeld, A. The geographic scaling of biotic interactions. *Ecography* 37, 406-415 (2013).
- Ledger, M. E., Brown, L. E., Edwards, F. K., Milner, A. M., & Woodward, G. Drought alters the structure and functioning of complex food webs. *Nature Climate Change*, 3(3), 223 (2013).
- Cagnolo, L., Valladares, G., Salvo, A., Cabido, M., & Zak, M. Habitat fragmentation and species loss across three interacting trophic levels: Effects of life-history and food-web traits. *Conservation Biology* 23(5), 1167-1175 (2009).
- Woodward, G., Ebenman, B., Emmerson, M., Montoya, J. M., Olesen, J. M., Valido, A., & Warren, P. H. Body size in ecological networks. *Trends in Ecology & Evolution* 20(7), 402-409 (2005).
- Vidal, M. M., Hasui, E., Pizo, M. A., Tamashiro, J. Y., Silva, W. R., & Guimaraes, P. R. Frugivores at higher risk of extinction are the key elements of a mutualistic network. *Ecology* 95(12), 3440-3447 (2014).
- O'Gorman, E. J., Pichler, D. E., Adams, G., *et al.* Impacts of warming on the structure and functioning of aquatic communities: individual-to ecosystem-level responses. In *Advances in ecological research* (Vol. 47, pp. 81-176). Academic Press (2012).
- Schleuning, M., Fründ, J., Schweiger, O., *et al.* Ecological networks are more sensitive to plant than to animal extinction under climate change. *Nature Communications* 7, 13965 (2016).
- Memmott, J., Craze, P. G., Waser, N. M., & Price, M. V. Global warming and the disruption of plant-pollinator interactions. *Ecology Letters* 10(8), 710-717 (2007).
- Hegland, S. J., Nielsen, A., Lázaro, A., Bjercknes, A. L., & Totland, Ø. How does climate warming affect plant-pollinator interactions?. *Ecology Letters* 12(2), 184-195 (2009).
- Rafferty, N. E., & Ives, A. R. Effects of experimental shifts in flowering phenology on plant-pollinator interactions. *Ecology Letters* 14(1), 69-74 (2011).
- Bartomeus, I., Park, M. G., Gibbs, J., Danforth, B. N., Lakso, A. N., & Winfree, R. Biodiversity ensures plant-pollinator phenological synchrony against climate change. *Ecology Letters* 16(11), 1331-1338 (2013).
- Kudo, G., & Ida, T. Y. Early onset of spring increases the phenological mismatch between plants and pollinators. *Ecology* 94(10), 2311-2320 (2013).
- Donoso, I., Stefanescu, C., Martínez-Abraín, A., & Traveset, A. Phenological asynchrony in plant-butterfly interactions associated with climate: a community-wide perspective. *Oikos* 125(10), 1434-1444 (2016).

- 29 Tylianakis, J. M., Tschirntke, T., & Lewis, O. T. Habitat modification alters the structure of tropical host–parasitoid food webs. *Nature* 445(7124), 202 (2007).
- 30 Traveset, A., Castro-Urgal, R., Rotllán-Puig, X., & Lázaro, A. Effects of habitat loss on the plant–flower visitor network structure of a dune community. *Oikos* 127(1), 45-55 (2018).
- 31 Vanbergen *et al.* Grazing alters insect visitation networks and plant mating systems. *Functional Ecology* 28(1), 178-189 (2014).
- 32 Eckert, C. G., Kalisz, S., Geber, M. A., *et al.* Plant mating systems in a changing world. *Trends in Ecology & Evolution* 25(1), 35-43 (2010).
- 33 Hagen, M., Kissling, W. D., Rasmussen, C., *et al.* Biodiversity, species interactions and ecological networks in a fragmented world. In *Advances in ecological research* (Vol. 46, pp. 89-210). Academic Press (2012).
- 34 Bascompte, J. Disentangling the web of life. *Science* 325(5939), 416-419 (2009).
- 35 Fortuna, M. A., Krishna, A., & Bascompte, J. Habitat loss and the disassembly of mutualistic networks. *Oikos* 122(6), 938-942 (2013).
- 36 Nielsen, A., & Totland, Ø. Structural properties of mutualistic networks withstand habitat degradation while species functional roles might change. *Oikos* 123(3), 323-333 (2014).
- 37 Olesen, J. M., Bascompte, J., Dupont, Y. L., & Jordano, P. The modularity of pollination networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104(50), 19891-19896 (2007).
- 38 Vázquez, D. P., Chacoff, N. P., & Cagnolo, L. Evaluating multiple determinants of the structure of plant–animal mutualistic networks. *Ecology* 90(8), 2039-2046 (2009).
- 39 Laliberté, E., & Tylianakis, J. M. Deforestation homogenizes tropical parasitoid–host networks. *Ecology* 91(6), 1740-1747 (2010).
- 40 Pires, A. P., Marino, N. A., Srivastava, D. S., & Farjalla, V. F. Predicted rainfall changes disrupt trophic interactions in a tropical aquatic ecosystem. *Ecology* 97(10), 2750-2759 (2016).
- 41 CaraDonna, P. J., Petry, W. K., Brennan, R. M., Cunningham, J. L., Bronstein, J. L., Waser, N. M., & Sanders, N. J. Interaction rewiring and the rapid turnover of plant–pollinator networks. *Ecology Letters* 20(3), 385-394 (2017).
- 42 Traveset, A., & Richardson, D. M. Mutualistic interactions and biological invasions. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 45, 89-113 (2014).
- 43 Traveset, A., Heleno, R., Chamorro, S., *et al.* Invaders of pollination networks in the Galápagos Islands: emergence of novel communities. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 280(1758), 20123040 (2013).
- 44 Heleno, R. H., Olesen, J. M., Nogales, M., Vargas, P., & Traveset, A. Seed dispersal networks in the Galápagos and the consequences of alien plant invasions. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 280(1750), 20122112 (2013).
- 45 Vacher, C., Daudin, J. J., Piou, D., & Desprez-Loustau, M. L. Ecological integration of alien species into a tree-parasitic fungus network. *Biological Invasions* 12(9), 3249-3259 (2010).
- 46 Aizen, M. A., Morales, C. L., & Morales, J. M. Invasive mutualists erode native pollination webs. *PLoS Biology* 6(2), e31 (2008).
- 47 Bascompte, J., & Jordano, P. Plant-animal mutualistic networks: the architecture of biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 38, 567-593 (2007).
- 48 Rezende, E. L., Lavabre, J. E., Guimarães, P. R., Jordano, P., & Bascompte, J. Non-random coextinctions in phylogenetically structured mutualistic networks. *Nature* 448(7156), 925 (2007).
- 49 Valiente-Banuet, A., & Verdú, M. Human impacts on multiple ecological networks act synergistically to drive ecosystem collapse. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11(8), 408-413 (2013).
- 50 Stouffer, D. B., Cirtwill, A. R., & Bascompte, J. How exotic plants integrate into pollination networks. *Journal of Ecology* 102(6), 1442-1450 (2014).
- 51 Kaiser-Bunbury, C. N., Valentin, T., Mougil, J., Matatiken, D., & Ghazoul, J. The tolerance of island plant–pollinator networks to alien plants. *Journal of Ecology* 99(1), 202-213 (2011).
- 52 Padrón, B., Traveset, A., Biedenweg, T., Díaz, D., Nogales, M., & Olesen, J. M. Impact of alien plant invaders on pollination networks in two archipelagos. *PLoS One* 4(7), e6275 (2009).
- 53 Albrecht, M., Padrón, B., Bartomeus, I., & Traveset, A. Consequences of plant invasions on compartmentalization and species' roles in plant–pollinator networks. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 281(1788), 20140773 (2014).
- 54 Valdovinos, F. S., Ramos-Jiliberto, R., Flores, J. D., Espinoza, C., & López, G. Structure and dynamics of pollination networks: the role of alien plants. *Oikos* 118(8), 1190-1200 (2009).
- 55 Stouffer, D. B., Sales-Pardo, M., Sirer, M. I., & Bascompte, J. Evolutionary conservation of species' roles in food webs. *Science* 335(6075), 1489-1492 (2012).
- 56 Emer, C., Memmott, J., Vaughan, I. P., Montoya, D., & Tylianakis, J. M. Species roles in plant–pollinator communities are conserved across native and alien ranges. *Diversity and Distributions* 22(8), 841-852 (2016).
- 57 Albrecht, M., Ramis, M. R., & Traveset, A. Pollinator-mediated impacts of alien invasive plants on the pollination of native plants: the role of spatial scale and distinct behaviour among pollinator guilds. *Biological Invasions* 18(7), 1801-1812 (2016).
- 58 Tur, C., Sáez, A., Traveset, A., & Aizen, M. A. Evaluating the effects of pollinator-mediated interactions using pollen transfer networks: evidence of widespread facilitation in south Andean plant communities. *Ecology Letters* 19(5), 576-586 (2016).
- 59 González-Castro, A., Traveset, A., & Nogales, M. Seed dispersal interactions in the Mediterranean Region: contrasting patterns between islands and mainland. *Journal of Biogeography* 39(11), 1938-1947 (2012).
- 60 Emer, C., Vaughan, I. P., Hiscock, S., & Memmott, J. The impact of the invasive alien plant, *Impatiens glandulifera*, on pollen transfer networks. *PLoS One* 10(12), e0143532 (2015).
- 61 Guimarães Jr, P. R., Jordano, P., & Thompson, J. N. Evolution and coevolution in mutualistic networks. *Ecology Letters* 14(9), 877-885 (2011).
- 62 Aizen, M. A., Gleiser, G., Sabatino, M., Gilarranz, L. J., Bascompte, J., & Verdú, M. The phylogenetic structure of plant–pollinator networks increases with habitat size and isolation. *Ecology Letters* 19(1), 29-36 (2016).
- 63 Poisot, T., Mouquet, N., & Gravel, D. Trophic complementarity drives the biodiversity–ecosystem functioning relationship in food webs. *Ecology Letters* 16(7), 853-861 (2013).

- 64 Schleuning, M., Fründ, J., & García, D. Predicting ecosystem functions from biodiversity and mutualistic networks: an extension of trait-based concepts to plant–animal interactions. *Ecography* 38(4), 380-392 (2015).
- 65 Fontaine, C., *et al.* The ecological and evolutionary implications of merging different types of networks. *Ecology Letters* 14(11), 1170-1181 (2011).
- 66 Sauve, A., Fontaine, C., & Thébault, E. Structure–stability relationships in networks combining mutualistic and antagonistic interactions. *Oikos* 123(3), 378-384 (2014).
- 67 Pocock, M. J., Evans, D. M., & Memmott, J. The robustness and restoration of a network of ecological networks. *Science* 335(6071), 973-977 (2012).
- 68 Kivelä, M., Arenas, A., Barthelemy, M., Gleeson, J. P., Moreno, Y., & Porter, M. A. Multilayer networks. *Journal of Complex Networks* 2(3), 203-271 (2014).

REFERENCIAS COMENTADAS

Memmott, J., Craze, P. G., Waser, N. M., & Price, M. V. (2007). Global warming and the disruption of plant–pollinator interactions. *Ecology Letters* 10(8), 710-717.

Es uno de los primeros trabajos en los que se explora la disrupción potencial del mutualismo existente entre plantas y polinizadores debida al cambio climático. Se emplean datos de una red empírica altamente resulta entre 1420 polinizadores y 429 plantas para simular las consecuencias de cambios fenológicos que podrían esperarse si los niveles de CO₂ en la atmosfera se doblaran. Los autores encontraron que, dependiendo de las asunciones de los modelos, cambios fenológicos redujeron los recursos florales entre un 17 y un 50% para los polinizadores, causando que el solapamiento planta-polinizador disminuyera hasta la mitad. Dicha reducción también hizo disminuir la amplitud de nicho de los polinizadores. Por tanto, el resultado de esas disrupciones es la extinción de polinizadores, plantas y sus interacciones.

Tylianakis, J. M., Didham, R. K., Bascompte, J., & Wardle, D. A. (2008). Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters* 11(12), 1351-1363.

Se trata de una revisión que sintetizó por primera vez los resultados de unos 700 estudios y que mostró que los distintos motores de cambio global suelen alterar las interacciones de competencia en plantas y animales, ejercen efectos multitróficos en la red trófica de los descomponedores, aumentan la intensidad de las infecciones por patógenos, debilitan los mutualismos que involucran plantas, estimulan la herbivoría y tienen efectos variables sobre la depredación. El efecto de los distintos motores actuando simultáneamente crea desafíos para poder predecir las respuestas futuras al cambio global. El estudio concluye que el principal desafío es determinar cómo el contexto biótico y abiótico altera la dirección y la magnitud de los efectos del cambio global sobre las interacciones bióticas.

Fontaine, C., *et al.* (2011). The ecological and evolutionary implications of merging different types of networks. *Ecology Letters* 14(11), 1170-1181.

En este artículo se esboza por primera vez un marco conceptual para el estudio de redes ecológicas compuesto por más de un tipo de interacción. Dividir las redes por tipos de interacción, en el espacio o en el tiempo, es una conveniencia metodológica; sin embargo, en la naturaleza, todas estas redes están vinculadas por especies compartidas. Fusionar las diversas interacciones ecológicas en un único marco es sin duda el gran desafío en la ecología de redes. Este trabajo destaca las preguntas clave y áreas de investigación futuras que ayudarán a desentrañar los procesos ecológicos y evolutivos que dan forma a las comunidades biológicas y a entender su dinámica.

Araújo, M.B. & Rozenfeld, A. (2013) The geographic scaling of biotic interactions. *Ecography* 37, 406-415.

Un principio central en ecología y biogeografía es que los rangos de las especies están determinados, en líneas generales, por el clima, mientras que los efectos de las interacciones bióticas se manifiestan a escala local. Mientras que existe amplia evidencia de la primera proposición, la segunda es aún una cuestión de controversia. Para abordar esta cuestión, estos autores desarrollaron un modelo matemático para predecir la superposición espacial (es decir, la coincidencia) entre pares de especies sujetas a todos los posibles tipos de interacciones. Posteriormente, identificaron la escala de resolución en la que se perdían los solapamientos de rango predichos. Encontraron que la co-ocurrencia que surge de las interacciones positivas, como el mutualismo (+/+) y el comensalismo (+/0), se manifiestan a través de todas las escalas. Sin embargo, las interacciones negativas, como la competencia (-/-) y el amensalismo (-/0), generan patrones de co-ocurrencia en tablero de ajedrez que sólo son discernibles en resoluciones finas. La dependencia de la escala en las interacciones consumidor-recurso (+/-) mostró depender de la fuerza de las dependencias positivas entre las especies. Los resultados de este estudio, por tanto, pusieron en tela de juicio la opinión generalizada de que el clima es suficiente para caracterizar las distribuciones de especies a gran escala, y también demostraron que es poco probable que la firma espacial de la competencia sea discernible más allá de lo local y escalas regionales.

Tylianakis, J. M., & Morris, R. J. (2017). Ecological networks across environmental gradients. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 48, 25-48.

En este trabajo se revisan los resultados del análisis de redes a través de gradientes ambientales, los cuales han revelado importantes cambios en su estructura, dinámica y funcionamiento. En términos generales, estos cambios son agrupados según tres mecanismos no excluyentes: (a) cambios en la composición de especies de la red (impulsados por patrones de interacción de especies invasoras, extinciones no aleatorias de especies de acuerdo con sus rasgos, o diferencias entre especies en sus respuestas poblacionales a lo largo de gradientes); (b) cambios que alteran las frecuencias de interacción a través de cambios en la eficiencia de búsqueda (debidos a la alteración de la estructura del hábitat) o cambios en el solapamiento espacial y temporal; y (c) cambios en los procesos y patrones coevolutivos. El considerar los procesos espaciales y temporales permite elucidar la variación de la red y

mejorar las predicciones de su respuesta al cambio global. La evidencia emergente vincula la estructura de las redes con el funcionamiento del ecosistema; sin embargo, los autores advierten que al tener en cuenta las meta-redes o redes multicapa pueden modificarse las interpretaciones de su estructura, estabilidad y funcionamiento.

GLOSARIO

Anidamiento ('nestedness'). Patrón por el cual las especies especialistas interactúan con subconjuntos de las especies con las que interactúan las generalistas). En general, redes más anidadas son más robustas a extinciones secundarias.

Conectancia. Proporción de enlaces observados en una red dada, relativos a todos los posibles.

Interaction evenness. Índice que evalúa el grado de heterogeneidad en el número de especies con que las distintas especies de la red interactúan.

Invasional meltdown. Hipótesis que señala que las interacciones positivas entre especies invasoras intensifican sus impactos y promueven nuevas invasiones.

Meta-red. Red compuesta por diferentes sub-redes conectadas entre sí por procesos de colonización y generalmente asociadas a parches de hábitat en un paisaje fragmentado.

Modularidad. Tipo de estructura de una red donde existen especies que cuya interacción entre sí es mucho más fuerte que con el resto de las especies que forman la red.

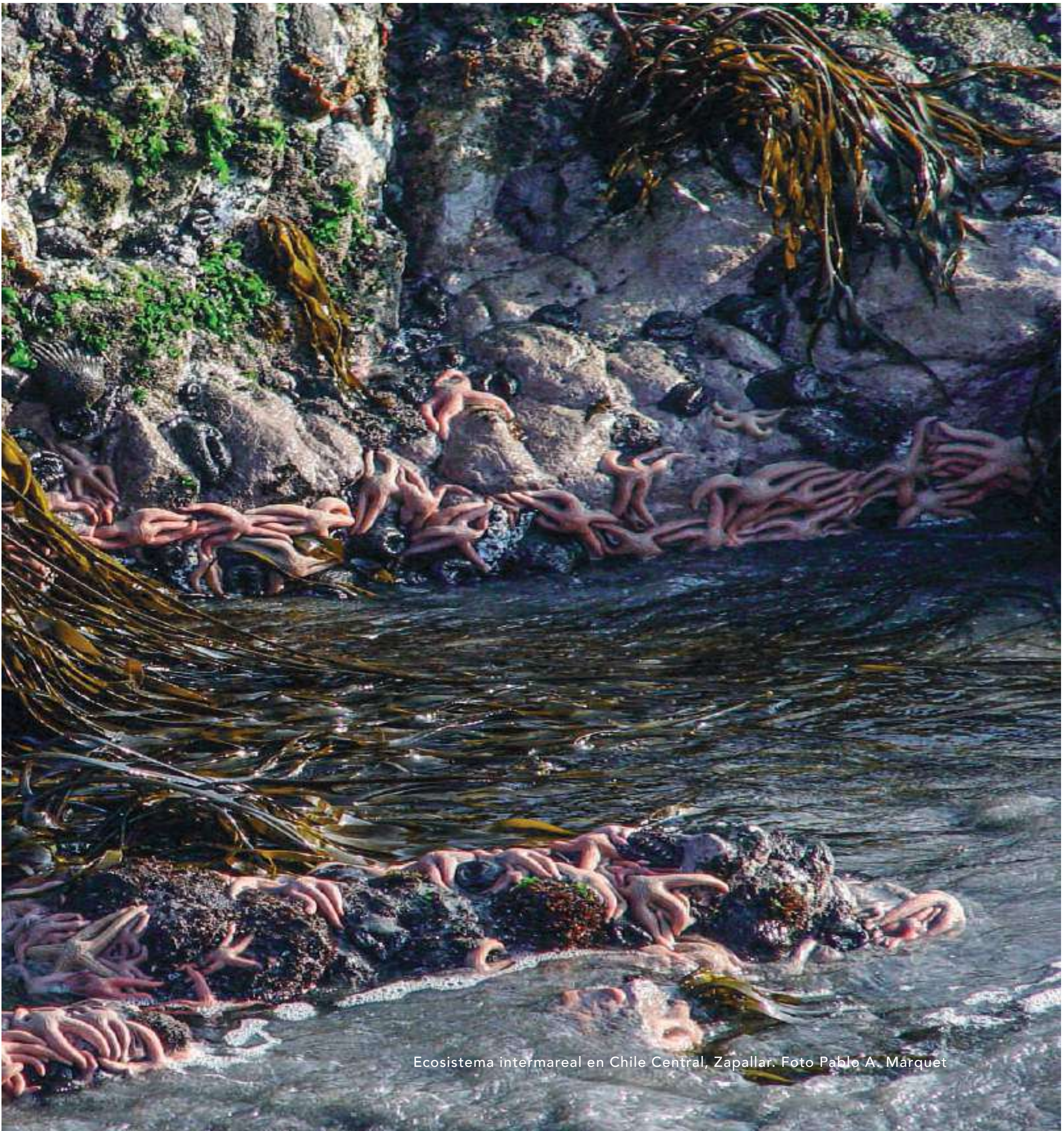
Recableado (reordenamiento) de interacciones. Cambio en las interacciones entre las especies que componen una red ecológica, como resultado de cambios en el ambiente abiótico o biótico.

Redes multicapa o multiplex. Se denomina así a las redes que incluyen múltiples tipos de interacciones a la vez, como por ejemplo, las de depredación, parasitismo, y mutualismo.

Supergeneralistas. Nombre que reciben las especies que poseen un nicho muy amplio y, por lo tanto, pueden interactuar con muchas otras especies en una red.

Trait matching. Acoplamiento fenotípico entre los rasgos de especies que interactúan dentro de una red (e.g. diámetro del fruto y tamaño del pico en aves) como resultado de procesos coevolutivos.





Ecosistema intermareal en Chile Central, Zapallar. Foto Pablo A. Marquet



Tillandsia landbeckii, bromeliácea que forma extensos parches en la zona costera del desierto de Atacama y sustenta una comunidad de especies de insectos y vertebrados. Esta planta obtiene el agua a partir de las neblinas, por lo que es altamente sensible a fluctuaciones en la intensidad y contenido de humedad de éstas. Foto Pablo A. Marquet

Cambios climáticos y distribución geográfica de las especies

Mariana M. Vale y Miguel Araújo

RESUMEN

Las especies pueden ver aumentada o disminuida su área de distribución por efecto del cambio climático. Estos cambios ya están siendo observados en diversas especies alrededor del planeta. Los cambios en la distribución de las especies pueden, sin embargo, verse condicionados por la limitada capacidad de dispersión de algunas especies; por la desaparición del clima ideal para persistencia de las especies en escenarios futuros; o por la degradación generalizada de los paisajes que den lugar a barreras geográficas para el movimiento de las especies.

Una medida para aumentar la capacidad de las especies para adaptarse al cambio climático es la restauración de áreas degradadas, orientada a aumentar la permeabilidad de los paisajes y a favorecer el movimiento de las especies, en conjunto con mejorar las redes de Áreas Protegidas que serán fundamentales para la persistencia y adaptación de las especies. Estas medidas traen beneficios adicionales para la biodiversidad y también para las actividades humanas. Aunque es una estrategia de simple implementación técnica, puede estar condicionada por cuestiones políticas y de ordenación territorial, especialmente en regiones donde exista una elevada competencia por el uso del espacio natural o rural.

1. Distribución geográfica de las especies

La distribución geográfica de una especie corresponde a las áreas donde podemos detectar la presencia de sus individuos. Este área normalmente se representa en mapas como los que vemos por ejemplo en las guías de aves y suelen ser abstracciones a partir de datos puntuales ya que no se encontrarán individuos de la especie en toda el área delimitada por el mapa. Por el contrario, los individuos sólo serán detectados donde las condiciones ambientales permitan su supervivencia y sólo persistirán donde, además de sobrevivir, puedan también reproducirse. Por eso, para delimitar la distribución geográfica de las especies es preciso comprender la relación que establecen con el ambiente físico y biológico a su alrededor, determinando las condiciones necesarias para su ocurrencia en el tiempo y en el espacio. Al comprender cuáles son las condiciones necesarias para la ocurrencia de una especie, podemos, por ejemplo, predecir cómo será su distribución geográfica en respuesta a alteraciones en el hábitat o a procesos que se manifiestan a mayor escala como el cambio climático actual. Este ejercicio ya se ha realizado para innumerables organismos en diversas regiones, y la tendencia general que emerge de los modelos es que la mayoría de las especies tenderán a ver reducida su área de distribución (Figura 1).

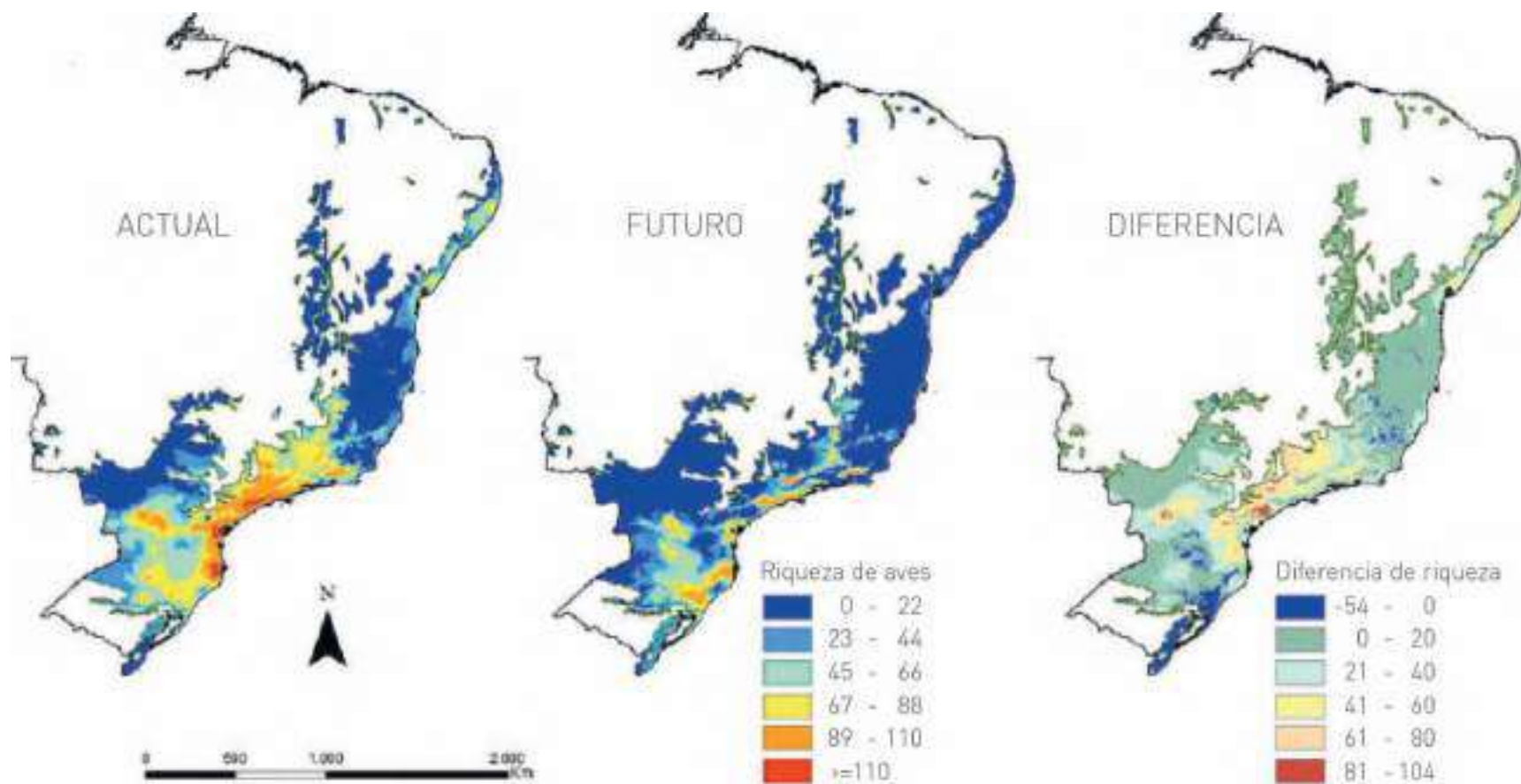


Figura 1. Riqueza de aves endémicas y amenazadas en el **Bosque Atlántico**. Izquierda: riqueza actual. Medio: Riqueza futura (2050) de acuerdo con las predicciones de modelos que consideran los efectos de escenarios de cambio climático. Derecha: Diferencia entre la riqueza futura y actual. El estudio prevé la contracción de la distribución geográfica de la mayoría de las especies lo que se asocia a una gran reducción del área de mayor riqueza de especies. Para algunas áreas aisladas, sin embargo, se predice un aumento de la riqueza de aves, las que podrían representar posibles refugios en escenarios de cambio climático. Modificado de Vale et al. (2018)¹

El estudio de la distribución de las especies genera información sobre la relación que establecen con el ambiente físico y biológico a su alrededor y puede ser utilizado para predecir cómo su distribución puede responder al cambio climático

Peterson y colaboradores desarrollaron un modelo conceptual para comprender los factores que determinan la distribución geográfica de las especies, llamado Diagrama de BAM, donde “B” corresponde a las condiciones “bióticas”, “A” a las condiciones “abióticas” y “M” al “movimiento” o accesibilidad del área². De acuerdo con este modelo, una especie se encontrará en una determinada región geográfica si estos tres factores son favorables (Figura 2). Las condiciones abióticas comprenden las

condiciones físicas, generalmente climáticas, a las que la especie se encuentra adaptada. El componente abiótico del Diagrama de BAM es sin duda el más intuitivo, pues, al final, no encontramos tucanes en la Tierra del Fuego ni tampoco pingüinos en la Amazonía. Sin embargo, aunque las condiciones abióticas en una determinada región sean favorables para una especie, sólo se encontrará en esa región si es capaz de llegar a ella. Por ejemplo, una planta endémica y adaptada al clima mediterráneo en Chile probablemente podría estar presente en la Península Ibérica. No obstante, este proceso no siempre se da debido a la barrera geográfica que el Océano Atlántico representa y que representaría el factor “movimiento” del Diagrama de BAM. Las áreas climáticamente adecuadas a menudo no son accesibles debido a las barreras geográficas o la reducida capacidad de dispersión innata de la especie. Así, la “accesibilidad” del área es un factor necesario para la presencia de la especie.

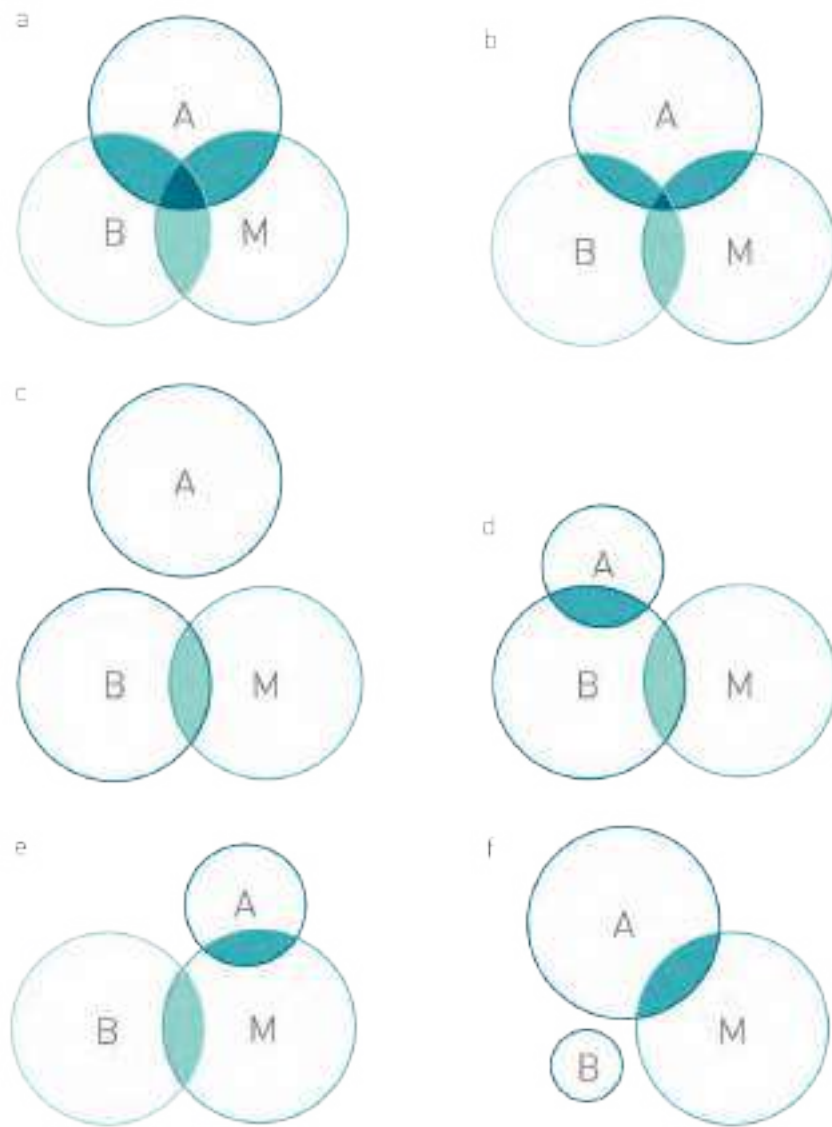


Figura 2. Diagrama de BAM que ilustra cómo los factores que determinan la distribución geográfica de las especies pueden ser afectados por los cambios climáticos: "A" representa el área donde las condiciones "abióticas", en este caso el clima, son favorables para una determinada especie; "B" representa el área donde los factores "bióticos", tales como la presencia de presas, son favorables para la presencia de la especie; "M" representa el área accesible a la especie a través del "movimiento", dada su capacidad de dispersión y la presencia o ausencia de barreras geográficas. a) La especie podrá encontrarse en el área de superposición entre B, A y M representada en azul oscuro, es decir, el área que sea accesible y donde las condiciones abióticas y bióticas sean favorables a la ocurrencia de la especie. b) Los cambios climáticos pueden desplazar el clima favorable de la especie, reduciendo el área de superposición entre B, A y M y, por lo tanto, la distribución de la especie, aunque el tamaño del área climáticamente favorable permanezca igual; c) El desplazamiento de las zonas climáticamente favorables puede ser tan grande, sin embargo, que ya no haya superposición con áreas bióticamente favorables o accesibles y en este caso la especie podrá desaparecer, aunque el tamaño del área climáticamente favorable permanezca igual; d) El área climáticamente favorable puede ser muy reducida, dejando de estar accesible a la especie; e) El área climáticamente favorable puede ser muy reducida, estando accesible a la especie, pero fuera de las condiciones bióticas necesarias para su ocurrencia; f) El área climáticamente favorable para la especie puede no ser afectada por los cambios climáticos, pero las especies con las que interactúa sí, dejando la especie sin condiciones bióticas favorables para su ocurrencia

En este sentido, la globalización ha aumentado enormemente el tráfico de especies entre los diferentes continentes, eliminando virtualmente las barreras geográficas y posibilitando que las especies colonicen, muchas veces accidentalmente, nuevas regiones geográficas. En las regiones de destino, muchas de estas especies inmigrantes no encuentran "enemigos naturales" o competidores locales, tales como depredadores y parásitos, por lo que en ocasiones proliferan de manera masiva generando perjuicios ambientales y económicos. Este ejemplo nos lleva al último componente previsto por el Diagrama de BAM, los condicionantes bióticos, que comprenden las relaciones biológicas en términos de presencia o ausencia de especies que facilitan o perjudican la ocurrencia de otra. La presencia de presas, por ejemplo, debe influenciar positivamente la ocurrencia de un predador, mientras que la presencia de un parásito, o competidor, debe influenciar negativamente su

ocurrencia. En este capítulo utilizaremos el diagrama de BAM para estructurar la discusión de los efectos previstos y observados del cambio climático sobre la distribución geográfica de las especies (Figura 2).

2. Vulnerabilidad al cambio climático

Los cambios climáticos son una fuerte amenaza para la biodiversidad y, por lo tanto, los estudios que se centran en la evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas naturales (especies, hábitats o ecosistemas) a estos cambios son una prioridad. La vulnerabilidad al cambio climático presenta varias facetas. Sabemos, por ejemplo, que algunas regiones del planeta estarán más expuestas al cambio climático que otras, es decir, a sufrir cambios más intensos de temperatura o precipitación. La "exposición" incide sobre este aspecto de la vulnerabilidad midiendo la magnitud y

la frecuencia del cambio climático a que un sistema natural está expuesto. Al mismo tiempo, sabemos que algunos sistemas son más sensibles que otros, o sea, que un mismo aumento de temperatura puede ser indiferente para un sistema pero catastrófico para otro. La “sensibilidad” se centra en este aspecto de la vulnerabilidad, midiendo cuándo o cómo será el sistema afectado por el cambio climático. Finalmente, la “capacidad adaptativa” se refiere a la capacidad de respuesta del sistema, para minimizar los efectos adversos del cambio climático. Una analogía interesante para ilustrar estos aspectos de la vulnerabilidad está en el contacto de personas con el Sol³. Una persona que vive en los trópicos tiene necesariamente más exposición al sol. Sin embargo, incluso en los trópicos, la vulnerabilidad de las personas al sol puede diferenciarse. Sabemos que las personas de piel clara son más sensibles al sol que aquellas de piel oscura, pues la melanina confiere protección natural contra la radiación solar evitando, hasta cierto punto, los daños generados por la exposición excesiva. Sin embargo, individuos con la misma exposición y sensibilidad al sol pueden presentar grados de vulnerabilidad diferentes, dependiendo de su capacidad adaptativa que, en este ejemplo, se manifiesta en la capacidad de abrigarse del Sol, sea evitando ambientes soleados o utilizando artefactos como protector solar o gorra. Así, dos especies diferentes que ocurren en la misma región geográfica pueden tener vulnerabilidades bastante diferentes al cambio climático.

2.1 Posibles respuestas al cambio climático

En general, las especies pueden desarrollar cuatro respuestas al cambio climático: aclimatación, adaptación, dispersión, o extinción⁴. La aclimatación es una respuesta fisiológica del individuo a los cambios en el ambiente circundante. Un ejemplo de aclimatación es el aumento gradual de la concentración de hemáties en la sangre de los habitantes de las regiones costeras cuando viajan a regiones de gran altitud como los Andes. Obviamente existe un límite fisiológico en ese tipo de respuesta y por eso mismo los mejores escaladores del mundo no permanecen más que algunas horas en la cima del Monte

Everest. La adaptación, en cambio, es la respuesta evolutiva modelada por la selección natural, donde individuos con mayor aptitud para tolerar las nuevas condiciones climáticas dejan un mayor número de descendientes, haciendo la población más capaz, generación tras generación, de mantenerse en las nuevas condiciones. A las especies que no son capaces de producir respuestas fisiológicas o adaptativas al cambio climático, les queda la posibilidad de dispersarse a áreas que mantengan o adquieran el clima al que ya están adaptadas. Si no son capaces de dispersarse la extinción es prácticamente inevitable.

La literatura científica enfatiza en la respuesta adaptativa al cambio climático, es decir, al rápido cambio de atributos ecológicos a lo largo del tiempo, debido a su prominente papel en la teoría evolutiva que es unificadora dentro de la biología. Sin embargo, existe una fuerte tendencia a la conservación del nicho fisiológico o lo que es lo mismo, en el mantenimiento de los límites de tolerancia climática de las especies a lo largo del tiempo, especialmente en lo que se refiere a los límites térmicos máximos⁵. Por este motivo, es de esperar que muchas especies no tengan capacidad de alterar su tolerancia a variables climáticas importantes, lo que haría la dispersión como una de las pocas alternativas posibles a los cambios climáticos rápidos que están en curso⁶. Por todo esto, en este capítulo nos concentramos en la dispersión como respuesta al cambio climático.

Podemos esperar que muchas especies mantengan su nicho climático y, por lo tanto, tengan la dispersión como única posible respuesta al cambio climático

2.2 Factores abióticos

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) prevé cambios considerables hasta finales del siglo XXI con un aumento en la temperatura media global probablemente superando los 1,5°C en relación al período de 1850 a 1900 y eventos de



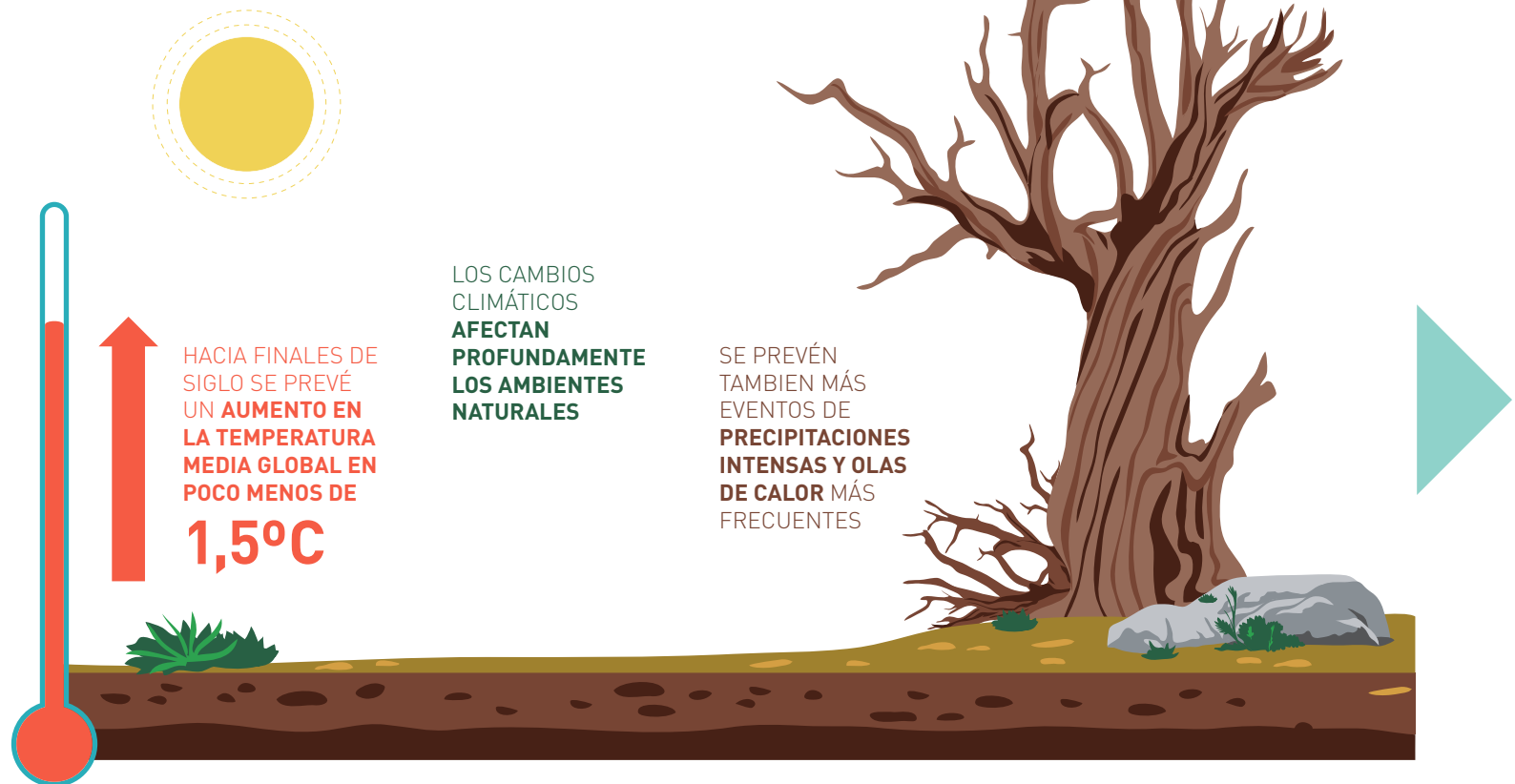
Figura 3. Peces como el bacalao noruego (*Gadus morhua*) han desplazado su distribución geográfica hacia los polos para compensar el reciente aumento de la temperatura en los océanos. Foto Peter Prokosch www.grida.no/resources/3489

precipitación más intensa y olas de calor más frecuentes² (ver Capítulo 4). En este escenario se puede esperar que los organismos compensen el aumento de la temperatura a través de desplazamientos hacia mayores altitudes o latitudes (por ejemplo, hacia los polos) y, para organismos marinos, desplazamientos hacia profundidades mayores. Estos ajustes en la distribución de las especies ya se observan en respuesta a los cambios actuales del clima. Por ejemplo, un seguimiento llevado a cabo durante veinticinco años de las poblaciones pesqueras en el Mar del Norte reveló que varias especies, incluyendo el bacalao de Noruega (*Gadus morhua*) y el rape (*Lophius piscatorius*), desplazaron su distribución hacia los polos como respuesta un aumento en la temperatura del fondo

del mar durante el invierno (Figura 3)⁷. Otras especies, como la solla europea (*Pleuronectes platessa*) y el arraijal europeo (*Leocoraja naevus*), en lugar de desplazar su distribución hacia los polos, desplazaron su distribución hacia zonas más profundas para compensar el aumento de la temperatura. Es interesante observar que las características intrínsecas de las especies relacionadas con su historia de vida influenciaron la respuesta que tuvieron y relación a las alteraciones del clima. Especies con tamaño corporal menor y que alcanzaron más rápidamente la edad reproductiva se desplazaron como respuesta al aumento de la temperatura. En cambio, las especies de mayor tamaño y, por lo tanto, con mayor valor comercial, no fueron capaces de compensar el cambio mediante la compensación

FACTORES QUE MEDIAN LA REDISTRIBUCIÓN DE LAS ESPECIES FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

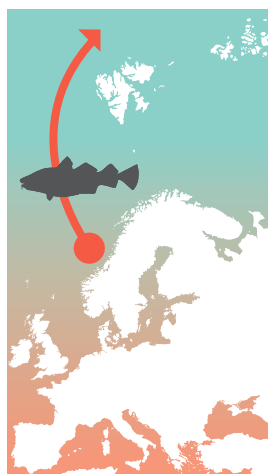
Diariamente somos testigos de perturbaciones que afectan a especies de todo el mundo producto del cambio climático. Frente a esto, los seres vivos pueden aclimatarse, adaptarse, migrar o extinguirse, según sus capacidades de resiliencia y el grado de modificación de su entorno. La tercera de estas acciones, la dispersión, es a la que mayormente han echado mano, ya que es la respuesta más rápida a la velocidad con la que se producen los cambios.



FACTORES QUE AFECTAN LA DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LAS ESPECIES

ABIÓTICO

Temperatura



El bacalao de Noruega se ha desplazado hacia los polos para encontrar aguas más frías y evitar las zonas con temperaturas mayores.

BIÓTICO

Incidencia de hongos patógenos

La incidencia de infecciones por hongos en anfibios ha aumentado con el cambio climático.



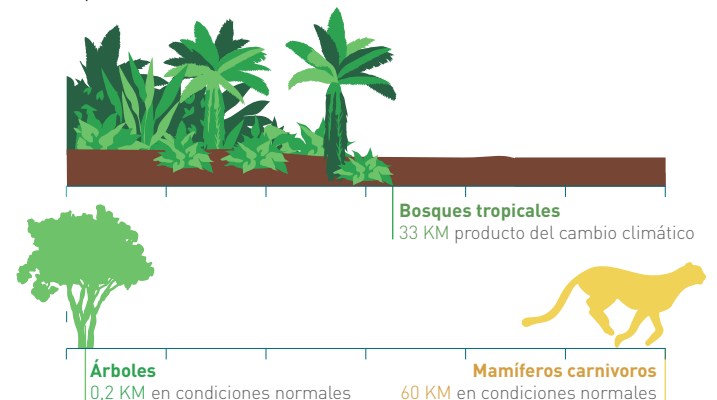
Fotografía: Dr Alex Hyatt, CSIRO Livestock Industries' Australian Animal Health Laboratory (AAHL).

MOVIMIENTO

Capacidad de dispersión

La velocidad de dispersión de la mayoría de los árboles es menor que la velocidad media del cambio climático.

Desplazamiento en una década





Del total de la superficie terrestre:

64% ES PAISAJE CREADO POR EL HOMBRE

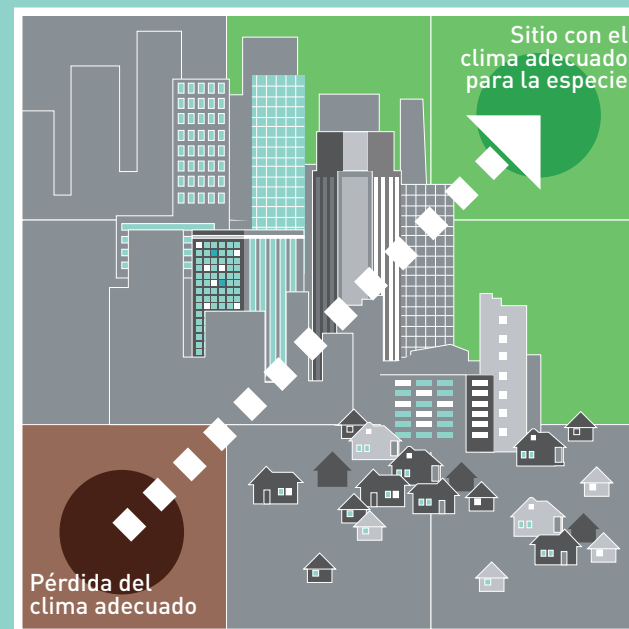
25% ES PAISAJE SEMINATURAL CON INFLUENCIA DE ACTIVIDAD HUMANA

80% LOS OCÉANOS TAMBIÉN SON IMPACTADOS POR LA CONTAMINACIÓN Y LOS FERTILIZANTES

ANTE ESTAS AMENAZAS EXISTEN CUATRO RESPUESTAS POR PARTE DE LAS ESPECIES

- 1 ACLIMATACIÓN**
Capacidad innata de los individuos de ajustar su fisiología al cambio climático. Esto permite que las especies mantengan su distribución geográfica actual, aunque el clima cambie.
- 2 ADAPTACIÓN**
Aumento a lo largo del tiempo, a través de selección natural, de la frecuencia en la población de individuos que son resistentes al cambio climático. Esto permite que las especies mantengan distribuciones geográficas actuales, a pesar de que el clima cambie.
- 3 DISPERSIÓN**
Desplazamiento gradual de poblaciones, acompañando el desplazamiento geográfico de las condiciones climáticas a las que están adaptados. Esto cambia la distribución geográfica de las especies a lo largo del tiempo, a medida que el clima cambia.
- 4 EXTINCIÓN:**
Cuando no hay dispersión ni respuestas fisiológicas o adaptativas al cambio climático, la tasa de mortalidad supera la tasa de natalidad, llevando a la población (o especie) a la extinción.

DIFICULTADES PARA LA DISPERSIÓN



Hoy ya no existen en el planeta áreas que no hayan sido afectadas de alguna forma por la actividad humana. La pérdida de hábitat, contaminación e introducción de especies invasoras afecta a casi todos los ecosistemas marinos, terrestres y dulceacuícolas, creando fuertes barreras a la dispersión de las especies. Estas barreras son un desafío nuevo para las especies, pues no existían en episodios anteriores de cambio climático.



Figura 4. La posibilidad de compensación altitudinal es limitada para especies que viven muy cerca de la cima de las montañas, como es el caso de la nostalgia de ceniza (*Tijuca condita*), ave endémica de bosques de neblina de la Bosque Atlántico (ver página opuesta). Fotos: Rafael Bessa (nostalgia de ceniza) y Camila Magalhães (montañas con Bosque Atlántico en Río de Janeiro, Brasil)

latitudinal, presentando así una menor capacidad adaptativa y en consecuencia una mayor vulnerabilidad al cambio climático. La posibilidad de compensación latitudinal también es limitada para especies que viven muy cerca del polo como el oso polar, que ya ha perdido una porción importante de su hábitat y se encuentra fuertemente amenazado por el cambio climático.

El IPCC también prevé que los cambios en el clima no serán espacialmente homogéneos (ver Capítulo 4). Por ejemplo, se prevé un mayor aumento de temperatura en las regiones templadas y polares que conducirá a una pérdida desproporcionada de biomas fríos comparado con otros biomas del planeta. Un análisis superficial podría sugerir que las regiones tropicales estarían menos amenazadas pero, lejos de ser así, ya hay estudios que demuestran que los trópicos son las regiones más expuestas a fenómenos climáticos extremos y a la aparición de los llamados climas “no análogos”, donde las combinaciones de variables que

se proyectan para estas regiones en el futuro, a menudo, no tienen paralelo en ninguna parte del planeta en la actualidad⁸. Por otro lado, como vimos, la exposición es sólo uno de los componentes de la vulnerabilidad. Hay un límite fisiológico en la tolerancia térmica de los organismos asociado con el punto de saturación de proteínas y muchas especies tropicales viven en ambientes con temperaturas ya bastante cercanas a este límite⁹. Así, aunque las regiones templadas y polares deban calentarse más que los trópicos, ese calentamiento no será suficiente para llevar a las especies de esas regiones a una situación de estrés térmico¹⁰. En cambio, en los trópicos, un pequeño aumento de temperatura puede ser una gran amenaza para un número muy elevado de especies. Además, las especies tropicales tienen distribuciones geográficas típicamente pequeñas, lo que es un indicador de su escasa capacidad de dispersión. En estos casos, es previsible que estas especies tengan pocas posibilidades de responder a las alteraciones del clima desplazándose a otras regiones aptas



para su supervivencia¹¹. Por otro lado, las especies de distribuciones restringidas son más vulnerables a factores de amenaza nuevos ya que se encuentran en una situación de debilidad demográfica. Cualquier factor adicional de amenaza, como los cambios en el clima, puede conducir a una mayor reducción de la distribución de especies que, en el caso de especies raras, puede significar la extinción.

Las especies tropicales viven en ambientes con temperaturas ya bastante cercanas a su límite fisiológico de tolerancia térmica e incluso un pequeño aumento de temperatura puede representar un factor de amenaza para esas especies

El cambio en la distribución geográfica de las especies hacia las altitudes más elevadas como forma de compensar

el aumento de la temperatura asociado al cambio climático, también ha sido observado en una variedad amplia de organismos (ver Capítulo 5). Por ejemplo, un estudio realizado en la zona Andina de Perú en el que se repitió un muestreo de aves realizado a lo largo de un transecto altitudinal en 1969, se constató un desplazamiento hacia altitudes más elevadas, en promedio, de unos 50 metros en 55 especies¹². Este tipo de compensaciones altitudinales se han encontrado en insectos, algas, plantas y mamíferos^{13,14}. Sin embargo, de forma análoga al desplazamiento latitudinal para el oso polar, las especies de cima de montaña están limitadas en su capacidad adaptativa ya que no puede compensar el aumento de temperatura a través de un desplazamiento hacia mayores altitudes. Además, difícilmente alcanzarán montañas más altas, pues los topes de montaña funcionan como islas aislando a sus poblaciones (Figura 4)¹⁵. Por este motivo se considera que los ecosistemas de alta montaña son indicadores del avance del cambio climático.



Figura 5. Los cambios climáticos globales pueden afectar la distribución de las especies directamente, alterando las condiciones climáticas en la región donde viven hoy, o indirectamente, alterando la distribución de especies con las que interactúa. Muchas especies de anfibios están amenazadas por la proliferación de hongos quitridios inducida por los cambios climáticos. Estos hongos causan una enfermedad infecciosa en la epidermis de los anfibios que culmina en su muerte. Foto Derechos Reservado bajo CC0

Es importante señalar que la capacidad de adaptación de las especies a través del desplazamiento de su área de distribución depende de 1) las distancias y velocidad necesarias para ajustarse a la redistribución hacia áreas climáticas adecuadas, y 2) que sigan existiendo climas apropiados para la permanencia de las especies tras el cambio climático. Las previsiones de cambio climático apuntan a la desaparición de diversas zonas climáticas del planeta, concomitantemente al surgimiento de nuevas zonas climáticas que podrán exceder la capacidad de respuesta fisiológica de muchas especies¹⁶. Esto significa que varias

especies simplemente no tendrán dónde desplazarse, aunque tengan alta capacidad de dispersión. Esta es una de las razones de las predicciones de contracción e incluso desaparición de muchas especies en escenarios futuros de cambio climático.

2.2 Factores bióticos

Como se muestra en el diagrama de BAM (Figura 2), las condiciones bióticas son otro importante determinante de la distribución geográfica de las especies. La presencia de algunas especies puede promover la ocurrencia de otras, como es el caso de la presencia de presas para depredadores, de hospedadores para parásitos, o de la especie con la que un organismo establece una **interacción mutualista**. Cuando existen este tipo de relaciones entre especies, los cambios en el área de distribución de una puede condicionar la presencia de otras. Las interacciones bióticas son particularmente importantes en los trópicos, ya que tienen una diversidad de especies extraordinarias y, por lo tanto, exhiben redes de interacciones muy complejas.

Como hemos visto anteriormente, en escenarios de cambio climático las especies pueden desplazar su distribución geográfica a nuevas áreas que se vuelven climáticamente favorables. Estas nuevas áreas, sin embargo, no están desprovistas de especies y por lo tanto la redistribución de comunidades de especies puede generar conflictos que bloquean la colonización de algunas especies. Un caso muy debatido es la expansión, mediada por el cambio climático, de la distribución del hongo quitridio (*Batrachochytrium dendrobatidis*) causante de una enfermedad letal en anfibios (Figura 5). En las últimas décadas al menos el 67% de las 110 especies de ranas del género *Atelopus*, endémico de América tropical, se extinguieron a causa de este hongo. Al analizar la fecha de las extinciones y los cambios en la temperatura, el calentamiento global se propone como un factor clave en esas extinciones, donde el aumento de la temperatura favorece el crecimiento del hongo¹⁷. El declive de las poblaciones de anfibios es un problema complejo y probablemente implica otras causas adicionales (por ejemplo, Di Rosa *et al.*¹⁸), pero ilustra cómo la fuerza



Figura 6. El Lince Ibérico es un caso raro de una especie que depende casi exclusivamente de otra, el conejo silvestre, aumentando así su vulnerabilidad. Cualquier factor que afecte la distribución y abundancia de conejos, sean las enfermedades que los tienen diezmando en el siglo XXI, ya sean los cambios climáticos y sus interacciones con las enfermedades de los conejos, puede conducir a reducciones catastróficas en las poblaciones de este felino endémico de la Península Ibérica. Foto Paco Campoy

de las interacciones ecológicas (en este caso, patógeno-hospedador) puede ser alterada con el cambio climático.

Otro ejemplo relativo a cómo el cambio climático puede modificar las relaciones bióticas entre especies es el caso del Lince Ibérico, considerado como uno de los felinos más amenazados del mundo (Figura 6). La alimentación del lince depende al 90% de la presencia del conejo. Las poblaciones de esta presa, otrora muy abundante, han sido cíclicamente diezgadas por dos enfermedades la

mixomatosis y la hemorrágica viral, causando reducciones drásticas en las poblaciones de lince. La mixomatosis fue descrita por primera vez en 1896 en Uruguay. Posteriormente fue observada en conejos domésticos en Brasil. El virus (*Myxoma*) fue introducido en Australia, en un intento de controlar la creciente población de conejo y, dos años después, una cepa del virus fue inoculada en conejos de una propiedad privada en Francia. En pocos meses la enfermedad se propagó por todo el país habiendo alcanzado, en 1953, la Península Ibérica. La enfermedad

Figura 7. Incluso animales con gran capacidad de dispersión, como el puma (*Puma concolor*), están limitados en su capacidad adaptativa por la masiva transformación de los paisajes por el hombre. Foto © David & Shiela Glatz. Derechos reservados

hemorrágica viral (DHV) fue descrita en 1984 en China como consecuencia de un proceso agudo que se produjo en un grupo de conejos importados de Alemania. En Europa la enfermedad fue identificada por primera vez en Italia en 1986, donde resultó en la muerte de 60 millones de conejos. La DHV llegó a la Península Ibérica en 1988, afectando tanto a los conejos domésticos como al conejo que ya se encontraba debilitada por la mixomatosis. Como consecuencia de estas enfermedades la distribución ibérica del linco pasó de un área total de 40.600 km², en la década de 1950, a 1.200 km² en 2005. Los modelos demográficos disponibles prevén que este felino, si no fuera objeto de una campaña activa de conservación, continuaría su declive pasando de los cerca de 250 individuos actuales a menos de 150 a finales de siglo²⁶. Sin embargo, bajo la presión combinada del cambio climático y de las dos enfermedades del conejo, la expectativa es que la especie de extinguido a mediados del siglo XXI.

El desplazamiento de especies en respuesta al cambio climático puede generar fricciones con las especies que permanecen en las áreas que se han vuelto climáticamente adecuadas para nuevas especies

2.3 Movimiento

La accesibilidad de las áreas climáticamente y biotícamente favorables, denominada “movimiento” en el diagrama de BAM (Figura 2), tiene un papel fundamental en las respuestas de las especies al cambio climático. Como hemos visto, las especies deben desplazar sus distribuciones para acomodarse a los cambios en el clima. La alteración de la distribución de un área a otra climáticamente más favorable depende, sin embargo, de la distancia a recorrer, de la velocidad con que los cambios ocurren, del nivel de fragmentación del paisaje y de la capacidad innata de dispersión de las especies. Los cambios climáticos actuales se están produciendo de forma muy acelerada en comparación con la mayoría de los episodios de cambio climático del

pasado, aunque todavía no hay consenso al respecto¹⁹. Además, la previsión es que la velocidad de los cambios actuales no sea la misma en todo el planeta. Mientras la vegetación mediterránea experimentarán cambios con velocidad media de 0,26 km/año, las sabanas inundadas como el Pantanal en Brasil advertirán estos cambios a una velocidad media de 1,26 km/año²⁰. Pero, ¿será esa velocidad demasiado rápida para que las especies puedan moverse y alcanzar otra zona donde establecerse? Naturalmente, depende de la especie. Los árboles, por ejemplo, se dispersan a una velocidad máxima media menor a 2 km por década, mientras que grandes carnívoros dispersan a una velocidad máxima media de casi 60 km por década²¹ (Figura 7). Esto demuestra que para muchos organismos el cambio climático actual es demasiado acelerado para permitir una respuesta compatible con su capacidad innata de dispersión.

La capacidad de dispersión de las especies para áreas que se vuelven climáticamente favorables es limitada por la velocidad del cambio climático y por la capacidad innata de dispersión de la especie

Incluso para especies con excelente capacidad de dispersión, los desplazamientos en respuesta al cambio climático representan un desafío. Los cambios climáticos actuales, a diferencia de los ocurridos en el pasado, se están produciendo en paisajes altamente modificados por el hombre y que representan barreras geográficas para muchas especies. Hoy en día, el 64% del área de los continentes está constituido por paisajes creados por el hombre, como ciudades, pastos y plantaciones, y otro 25% son paisajes semi-naturales, o sea, ecosistemas que están bajo alguna influencia de actividades humanas como caza, contaminación o carreteras^{22,23}. Los océanos también están altamente impactados por tráfico de embarcaciones, contaminación por plástico y fertilizantes agrícolas²⁴ (ver Capítulos 3, 6 y 7). Así, un área muy reducida del planeta se encuentra disponible para el libre tránsito de animales y plantas siguiendo los caprichos de un clima cada vez más imprevisible.



3. ¿Cómo facilitar el desplazamiento de las especies?

Desafortunadamente, aunque la sociedad está cada vez más concienciada sobre la necesidad de cambiar los modelos de consumo y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, el calentamiento global tiene una fuerte inercia y se manifestará durante varias décadas²¹. Por eso, además de las medidas de mitigación, necesitamos medidas de adaptación al cambio climático que minimicen, en la medida de lo posible, los efectos negativos sobre los sistemas naturales y humanos. Hemos visto que los animales y las plantas pueden cambiar sus distribuciones para acomodarse al cambio climático, pero hay una serie de obstáculos que dificultan este tipo de respuesta. ¿Qué se puede hacer para aumentar la capacidad adaptativa de las especies al cambio climático?

Algunos estudios sugieren la “colonización asistida”, es decir, translocación de especies amenazadas por el cambio climático a áreas climáticamente favorables fuera de su distribución actual. Esta estrategia ha tenido éxito con dos especies de mariposa en el Reino Unido que se introdujeron en localidades a decenas de kilómetros de su distribución actual, donde se preveía que el clima sería favorable²⁵. En el caso del Lince ibérico, los modelos también prevén que una estrategia optimizada de translocación de individuos de esta especie que considerara información sobre la disponibilidad de hábitat climático, en el presente y en el futuro, podría aumentar la población de Linces de los actuales 250 a 800 individuos²⁶. En cambio, una estrategia de translocación que sólo considerase las áreas actuales de distribución del Lince, tendría como consecuencia la extinción de la especie a finales del presente siglo.

Sin embargo, la estrategia de la translocación puede ser controvertida²⁷. La colonización asistida exige un conocimiento profundo de la biología de la especie, así como de las condiciones abióticas y bióticas necesarias para su establecimiento y, por lo tanto, es viable para una pequeña fracción de las especies bien conocidas, posiblemente carismáticas como el Lince. En cualquier

caso y aunque se tenga conocimiento profundo sobre todas las especies que están amenazadas por el cambio climático, no se dispone de recursos financieros para hacer la translocación de todas. Además, la historia revela que la introducción de especies fuera de su distribución puede ser catastrófica, ya que a menudo se generan conflictos con las comunidades humanas y/o se convierten en **especies invasoras**. Ante esta evidencia cabe reflexionar si los recursos invertidos en la translocación de especies podrían emplearse de manera más eficiente en otras acciones de adaptación al cambio climático que impliquen menos riesgos y abarquen una porción mayor de la biodiversidad.

La restauración de áreas degradadas aumenta la permeabilidad de los paisajes al desplazamiento de las especies, aumentando su capacidad adaptativa al cambio climático

Uno de los mayores obstáculos para el desplazamiento de especies hacia áreas climáticamente favorables es el predominio de paisajes altamente modificados por el hombre. Así, en lugar de dedicar recursos ayudando a algunas pocas especies se podrían invertir los recursos en llevar a cabo acciones de desfragmentación o permeabilización del territorio que favorezcan desplazamiento de especies en general. Esto puede hacerse a través de la restauración de áreas degradadas priorizando, en la medida de lo posible, las regiones que no tienen una fuerte vocación económica para evitar conflictos socioeconómicos. Esta estrategia tiene numerosas ventajas. En primer lugar, tiene el potencial de beneficiar a cualquier especie en el área recuperada, incluso aquellas cuya vulnerabilidad al cambio climático aún no ha sido detectada (y son la mayoría). En segundo lugar, la recuperación de áreas degradadas es beneficiosa no sólo para la biodiversidad, sino también para recuperar importantes servicios ecosistémicos de interés para la población humana, como la regulación del clima, el mantenimiento de la polinización, la fertilidad del suelo o la provisión de agua potable²⁸. El Bosque Mata Atlántico brasileño, por ejemplo, es uno de los

ecosistemas más grande biodiversidad y a la vez más amenazados del Planeta²⁹ que ya perdido más del 85% de su cobertura vegetal original y comienza ahora a sufrir la presión adicional del cambio climático (Figuras 1, 4). La degradación del **Bosque Atlántico** profunda y afecta directamente a la fertilidad del suelo y la sedimentación de los ríos, disminuyendo en gran medida la productividad de todo el ecosistema.

¿Cómo pueden las miles de especies del **Bosque Atlántico** desplazarse para acoplarse a estos cambios en un paisaje tan degradado? El Pacto para la Restauración de la Mata Atlántica es un acuerdo entre más de 160 organizaciones y empresas privadas para restaurar 15 millones de hectáreas para 2050, lo que aumentaría la cobertura forestal actual de este ecosistema en más del 20%³⁰. Aunque el objetivo principal del pacto no es aumentar la capacidad adaptativa de las especies al cambio climático, será un subproducto inevitable y fabuloso del proyecto. Para que la estrategia tenga mayor éxito, es importante incorporar información sobre la exposición y vulnerabilidad de las especies al cambio climático a las estrategias de restauración, para priorizar así las áreas donde la ganancia sea mayor en ese aspecto¹.

4. Conclusiones

El cambio climático está empujando la distribución geográfica de las especies hacia regiones donde el clima es el adecuado para la manutención de poblaciones viables. El potencial de desplazamiento de las especies, sin embargo, ha sido fuertemente perjudicado por la pérdida de hábitats naturales. Por lo tanto, una medida para aumentar la capacidad de las especies para adaptarse al cambio climático es la mantención de Áreas Protegidas prístinas y la restauración de áreas degradadas, orientada a aumentar la permeabilidad de los paisajes y a favorecer el movimiento de las especies. Esta medida trae beneficios adicionales para la biodiversidad y también para las actividades humanas. Aunque es una estrategia de simple implementación técnica puede estar condicionada por cuestiones

políticas y de ordenación territorial, especialmente en regiones donde exista una elevada competencia por el uso del espacio natural o rural.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 Vale, M. M., Souza, T. V., Alves, M. A. S. & Crouzeilles, R. Planning protected areas network that are relevant today and under future climate change is possible: the case of Atlantic Forest endemic birds. *PeerJ* 6, e4689 (2018).
- 2 Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. & Araújo, M. B. *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Princeton University Press, Princeton and Oxford (2011).
- 3 Glick, P., Stein, B., Edelson, N., Green, N., Beach, R., Cross, M., Enquist, C., Finch, D., Gailbraith, H., Girvetz, E., Gross, J., Harris, M., Hayhoe, K., Hoffman, J., Inkley, D., Jones, B., Joyce, L., Lawler, J., Ojima, D., O'Leary, J. & Young, B. *Scanning the conservation horizon: a guide to climate change vulnerability assessment*. The National Wildlife Federation (2011).
- 4 Holt, R.D. The microevolutionary consequences of climate change. *Trends in Ecology and Evolution* 5, 311–315 (1990).
- 5 Araújo, M. B., Ferri-Yáñez, F., Bozinovic, F., Marquet, P. A., Valladares, F. & Chown, S. L. Heat freezes niche evolution. *Ecology Letters* 16, 1206–1219 (2013).
- 6 Araújo, M. B. *Climate change and Spatial Conservation Planning*. En: *Spatial Conservation Prioritization: quantitative methods and computational tools* (eds. A. Moilanen, H. Possingham, K. Wilson). Oxford University Press (2009).
- 7 Perry, A. L., Low, P. J. & Reynolds, J. D. Climate change and distribution shifts in marine fishes. *Science* 308, 1912–1915 (2005).
- 8 Garcia, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C. & Araújo, M. B. Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science* 344, 1247579 (2014).
- 9 Huey, R. B., Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Vitt, L. J., Hertz, P. E., Alvarez Perez, H. J. *et al.* Why tropical forest lizards are vulnerable to climate warming. *Proc. Biol. Sci.*, 276, 1939–1948 (2009).
- 10 Khaliq, I., Hof, C., Prinzing, R., Böhning-Gaese, K. & Pfenninger, M. Global variation in thermal tolerances and vulnerability of endotherms to climate change. *Proceedings of the Royal Society B* 281, 20141097 (2014).
- 11 Pimm, S. L. Entrepreneurial Insects. *Nature* 411, 531–532 (2001).
- 12 Forero-Medina, G., Terborgh, J., Socolar, S. J. & Pimm, S. L. Elevational ranges of birds on a tropical montane gradient lag behind warming temperatures. *PLoS ONE* 6, e28535 (2011).
- 13 Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science* 320, 1768–1771 (2008).
- 14 Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B. & Thomas, C. D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science* 333, 1024 (2011).
- 15 LaSalle, F. A. & Jetz, W. Projected range contractions of montane biodiversity under global warming. *Proceedings of the Royal Society B* 277, 3401–3410 (2010).

- 16 Williams, J. W., Jackson, S. T. & Kutzbach, J. E. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 104, 5738–5742 (2007).
- 17 Pounds, A. J., Bustamante, M. R., Coloma, L. A., Consuegra, J. A., Fogden, M. P. L., Foster, P. N., Lamarca, E., Masters, K. L., Merino-Viteri, A., Puschendorf, R., Ron, S. R., Sanchez-Azofeifa, G. A., Still, C. J. & Young, B.E. Widespread amphibian extinctions from epidemic disease driven by global warming. *Nature* 439, 161–167 (2006).
- 18 Di Rosa, I., Simoncelli, F., Fagotti, A. & Pascolini, R. Ecology – the proximate cause of frog declines? *Nature* 447, E4–E5 (2007).
- 19 Hof, C., Levinsky, I., Araújo, M. B. & Rahbek, C. Rethinking species' ability to cope with rapid climate change. *Global Change Biology* 17, 2987–2990 (2011).
- 20 Loarie S. R., Duffy, P. B., Hamilton, H., Asner, G. P., Field, C. B. & Ackerly, D. D. The velocity of climate change. *Nature* 462, 1052–1055 (2009).
- 21 IPCC. Summary for policymakers. En: *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático.* Cambridge University Press, New York (2013).
- 22 Ellis, E. C. Anthropogenic transformation of the terrestrial biosphere. *Proceedings of the Royal Society A* 369, 1010–1035 (2011).
- 23 Ibisch, P.L., Hoffmann, M.T., Kreft, S., Pe'er, G., Kati, V. Biber-Freudenberger, L., DellaSala, D. A., Vale, M. M., Hobson, P. R. & Selva, N. A global map of roadless areas and their conservation status. *Science* 354, 1423–1427 (2016).
- 24 Cozar, A., Echevarría, F., González-Gordillo, J. I., Irigoien, X., Úbeda, B., Hernández-León, S., Palma, Á. T., Navarro, S., García-deLomas, J. & Ruiz, A. Plastic debris in the open ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 111, 10239–10244 (2014).
- 25 Willis, S. G., Hill, J. K., Thomas, C. D., Roy, D. B., Fox, R., Blakeley, D. S. & Huntley, B. Assisted colonization in a changing climate: a test-study using two U.K. butterflies. *Conservation Letters* 2, 46–52 (2009).
- 26 Fordham, D. A., Akçakaya, H. R., Brook, B. W., Rodriguez, A., Alves, P. C., Civantos, E., Triviño, M., Watts, M. J. & Araújo, M. B. Adapted conservation measures are required to save the Iberian Lynx in a changing climate. *Nature Climate Change* 3, 899–903 (2013).
- 27 Vilà, M. & P. E. Hulme. Jurassic Park?. No thanks. *Trends in Ecology & Evolution* 26, 496 (2011).
- 28 Benayas, J. M. R., Newton, A. C., Diaz, A. & Bullock, A. M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science* 325, 1121–1124 (2009).
- 29 Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Fonseca, G. A. B. & Kent, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853–858 (2000).
- 30 Crouzeilles, R., Beyer, H. L., Mills, M., Grelle, C. E. V. & Possingham, H. Incorporating habitat availability into systematic planning for restoration: a species-specific approach for Atlantic Forest mammals. *Diversity and Distribution* 21, 1027–1037 (2015).

REFERENCIAS COMENTADAS

Willis, S. G., Hill, J. K., Thomas, C. D., Roy, D. B., Fox, R., Blakeley, D. S. & Huntley, B. Assisted colonization in a changing climate: a test-study using two U.K. butterflies. *Conservation Letters* 2, 46–52 (2009).

En este estudio, los autores utilizaron modelos de relación entre especie y clima para predecir sitios adecuados para la introducción de dos especies de mariposas del Reino Unido, más allá de los márgenes de rango actuales donde se predice que el clima es adecuado (y también parece contener un hábitat adecuado). Los sitios eran cerca de 65 y 35 km más allá de los márgenes de rango de las especies. Ambas poblaciones introducidas crecieron y expandieron su rango durante 6 años (2001 hacia 2006, aún prosperando en 2008). Los autores, por lo tanto, sugieren que la colonización asistida bien planificada puede ser exitosa y ayudar a las especies de interés a enfrentar el cambio climático.

Hof, C., Levinsky, I., Araújo, M.B. & Rahbek, C. Rethinking species' ability to cope with rapid climate change. *Global Change Biology* 17, 2987–2990 (2011).

Este estudio desafía la opinión de que el cambio climático en curso es excepcional debido a su velocidad sin precedentes. Los autores discuten nuevas investigaciones geofísicas que muestran que los cambios climáticos dramáticos durante el Pleistoceno tardío ocurrieron extremadamente rápido, en tan solo unos pocos años. Estos cambios climáticos abruptos pueden haber sido incluso más rápidos que los contemporáneos, pero se han documentado relativamente pocas extinciones de especies en todo el continente para estos períodos. Esto plantea preguntas sobre la capacidad de las especies existentes para adaptarse al cambio climático en curso. Los autores sugieren que las especies pudieron hacer frente al rápido cambio climático en el pasado porque habitaban hábitats relativamente prístinos. Esto, sin embargo, ya no es un caso bajo el cambio climático actual, independientemente de su velocidad.

Vale, M. M., Souza, T. V., Alves, M. A. S. & Crouzeilles, R. Planning protected areas network that are relevant today and under future climate change is possible: the case of Atlantic Forest endemic birds. *PeerJ* 6, e4689 (2018).

Una estrategia clave en la conservación de la biodiversidad es el establecimiento de áreas protegidas, pero la redistribución de especies en respuesta al cambio climático en curso puede afectar la representatividad de las especies en esas áreas. Este estudio cuantificó la efectividad de la planificación de la red de áreas protegidas para representar a las aves endémicas del Bosque Atlántico bajo las condiciones actuales y futuras en escenarios de cambio climático. El estudio reconoció el conflicto entre la conservación de la biodiversidad y el desarrollo económico, incluidos tanto objetivos ecológicos como socioeconómicos. Descubrieron que si es posible una red de áreas que sea relevante hoy y bajo el cambio climático futuro, identificando un gran número de áreas que son relevantes para la conservación de las aves tanto actualmente como en el futuro.

GLOSARIO

Especie invasora. Especie introducida intencionalmente o accidentalmente por el hombre más allá de su rango original de distribución, y que, una vez introducida, se prolifera sin intervención humana, afectando negativamente el ambiente y/o las especies nativas de la región.

Interacción mutualista. Interacción biológica, entre individuos de diferentes especies, en donde ambos se benefician y mejoran su aptitud biológica.

Bosque Atlántico. Bosque tropical húmedo sudamericano que se extiende a lo largo de la costa atlántica de Brasil y tierra adentro hasta Paraguay y el norte de Argentina. Es un área prioritaria para la conservación porque tiene un nivel muy alto de biodiversidad, pero solo queda aproximadamente el 12% de su cubierta forestal.



Vista del Lago de Vichuquén con la plataforma tipo Uwitec y el material utilizado para la extracción de los núcleos de sedimentos. En la parte inferior una imagen del sedimento del Lago de Vichuquén. Foto Equipo PaleolPE

Cambio global en un lago costero de Chile central durante el último milenio

Matias Frugone-Álvarez, Claudio Latorre, Ana Moreno, Antonio Maldonado, Calogero Santoro, Maria Laura Carrevedo, Magdalena Fuentealba y Blas Valero-Garcés

RESUMEN

Los ecosistemas litorales se encuentran en un delicado equilibrio entre la influencia marina y terrestre, albergan una alta biodiversidad y ejercen un importante control sobre los ciclos y flujos biogeoquímicos entre los continentes y los océanos. Las proyecciones de cambio climático para los próximos 100 años señalan a estos ambientes como altamente vulnerables. Las costas mediterráneas y templadas, como las de España y Chile, han sufrido una fuerte modificación durante el último siglo debido al aumento de la población y las alteraciones concomitantes generadas por la industrialización y cambios en el uso del suelo. El Lago Vichuquén, en la costa centro-sur de Chile, proporciona un ejemplo de cómo estos ecosistemas han variado desde el Holoceno medio a raíz de las sinergias entre cambio climático e impacto humano, lo que establece un reto para su manejo y conservación. El estudio de sedimentos acumulados en el último milenio revela los cambios que experimentó la cuenca desde épocas prehispánicas (siglo XVI) hasta la actualidad y cómo la modificación reciente de la cobertura vegetal por plantaciones de pinos y eucaliptos ha impactado en la dinámica natural de la cuenca. Los cambios más recientes están asociados a la creciente presión antrópica resultado de la intensa urbanización del litoral, a lo que se suman variaciones climáticas como las de la Anomalía Climática Medieval (siglos X al XIII), la Pequeña Edad de Hielo (siglos XIV al XIX) y el reciente calentamiento global. El ejemplo de Vichuquén ilustra la necesidad de conocer la dinámica y evolución de los ecosistemas lacustre costeros con una perspectiva histórica milenial para comprender las características y magnitud de las respuestas de estos ambientes a crecientes impacto antrópico locales y cambios climático globales.

1. Los ecosistemas litorales y el Cambio Global

Los **márgenes continentales oceánicos** se extienden por más de 150.600 km y albergan una alta variedad de **ecosistemas litorales** que aportan un gran número de servicios ecosistémicos al planeta¹. Estos hábitats –que surgen del solapamiento de aguas continentales y oceánicas– han estado sometidos a grandes presiones ambientales por la creciente explotación socioeconómica de sus recursos. En Chile, la costa continental e islas adyacentes cubren más de 6.400 km de longitud, donde se encuentra una variedad de bahías, extensos bosques de algas pardas (bosques de kelp), arrecifes de coral y roca, diferentes tipos de playas, humedales, estuarios, lagunas, cañones y laderas rocosas donde los organismos interactúan con el medio abiótico y estructuran estos ecosistemas costeros. La interacción entre componentes marinos y terrestres genera gradientes de factores físicos y químicos (ej.; concentraciones de nutrientes, temperatura, salinidad, oxígeno, pH y material en suspensión, entre otros) que se están alterando a un ritmo sin precedentes en la historia del planeta debido al cambio global².

En este capítulo presentamos la historia ambiental del Lago de Vichuquén, un lago costero ubicado en la zona central de Chile, región del Maule (~36°S, a 5 m sobre el nivel del mar), basada en la reconstrucción paleoambiental a partir de sedimentos acumulados en el fondo del lago. En la costa, registros de alta resolución son escasos pero este registro ha permitido explorar con mayor detalle y

resolución temporal los cambios ambientales ocurridos en el pasado. La secuencia sedimentaria obtenida de más de doce metros de largo refleja los cambios acontecidos en la Bahía de Vichuquén desde hace unos 7.000 años, el cierre de la conexión con el Océano Pacífico hace unos 1.200 años y el desarrollo de un lago costero en el último milenio³. En este trabajo, nos centraremos en los cambios ocurridos durante los últimos 1.000 años representados en los primeros dos metros de sedimento cuando la dinámica del lago dejó de tener influencia marina. En el registro se analiza en detalle los cambios en la bioproductividad y flujos de sedimentos, asociados a variabilidad climática y a modificaciones antrópicas que se aceleraron desde el periodo colonial (siglo XVI) hasta el presente.

1.1 El Clima en Chile central durante los últimos 1.000 años

Vichuquén tiene un clima mediterráneo con influencia oceánica, presenta una baja oscilación térmica a lo largo del año con medias mensuales que fluctúan entre 10°C a 20°C y es muy atractivo para el turismo. Las precipitaciones tienen una marcada estacionalidad y los meses más lluviosos coinciden con el invierno austral (junio a agosto) debido al ingreso de **sistemas frontales ciclónicos** que traen humedad desde el sur generando chubascos en la costa. Por el contrario, durante los meses de noviembre a marzo el **Anticiclón del Pacífico Sur** se posiciona sobre la costa de Chile central produciendo la estación seca de verano.

En Chile central se reconocen dos anomalías climáticas significativas con respecto a épocas pre-industriales en los últimos mil años: la **Anomalía Climática Medieval** (ACM, entre 900-1.350 años d.C) y la **Pequeña Edad del Hielo** (PEH, entre 1.500-1.850 años d.C). La ACM fue descrita por primera vez en 1965 en Europa septentrional como un periodo cálido y húmedo gracias a los estudios de series climáticas y registros paleoambientales de Hubert Lamb. Posteriormente, esta anomalía climática se identificó a escala global debido a su relación con fases positivas de la **Oscilación del Atlántico Norte** (condición tipo-NAO)

y **El Niño Oscilación del Sur** (condición tipo-ENSO), y a cambios en la circulación oceánica del Atlántico^{4,5,6}. Por otra parte, la PEH se ha descrito como el periodo más frío de los últimos 4.000 años, posiblemente asociado a cambios en la radiación solar por la disminución de manchas solares y a anomalías tipo NAO y ENSO negativas, aunque también hubo una fuerte influencia del volcanismo⁷. En Chile central, sin embargo, son escasos los registros que describen los impactos de la ACM y PEH. Dos de los registros mejor estudiados son la Laguna de Chepical^{8,9} en los Andes y la Laguna de Aculeo en el valle central^{10,11} que muestran cierta coherencia con los registros a escala global con temperaturas relativamente mayores durante la ACM y menores durante la PEH. En la costa, los registros son escasos, por lo que el sondeo del Lago Vichuquén obtenido durante el año 2013 permite explorar con mayor detalle y alta resolución temporal los cambios ambientales acaecidos durante el último milenio.

1.2 Impacto antrópico

El Cambio Global ha impactado a todos los ecosistemas a través de efectos directos (sobreexplotación, extinción de especies, cambios de los usos del suelo) como indirectos (deposición atmosférica, cambios en los ciclos biogeoquímicos del N y C). La explotación intensiva de los recursos y el deterioro de los ecosistemas ha generado una respuesta social a escala global que ha desencadenado en una reacción de cooperación política entre grandes potencias plasmada en el **Acuerdo de París del 2015**. En este contexto de cambio global surgió el concepto **Antropoceno** como una nueva era geológica en la historia del planeta dominado por el impacto humano. En el caso de Chile central, ¿Cuándo se registran las primeras evidencias del impacto humano en los ecosistemas costeros de Chile Central? Los archivos históricos sobre asentamientos indígenas previos a la invasión europea en el siglo XVI consisten básicamente en crónicas, litigios y documentación burocrática. Estas fuentes están relatadas con los códigos culturales hispanos y coloniales de la época cuando el territorio era más bien una fuente de materias primas y productos básicos, además de

escenario para la evangelización^{12,13}. Además, los estudios arqueológicos son todavía limitados para documentar las características socioculturales de los pobladores y su relación con el ecosistema previos a los europeos, en la zona de Vichuquén¹³. Durante la Colonia y la República de Chile el ecosistema sufre la mayor transformación ambiental en su historia la que ha quedado registrado en los sedimentos del Lago Vichuquén.

2. El registro de Vichuquén

El registro del Lago de Vichuquén revela una compleja relación entre el impacto de las actividades humanas y el clima durante los últimos 1.000 años. La Figura 1 muestra una selección de indicadores geoquímicos medidos a lo largo del registro sedimentario. Por ejemplo, la relación Hierro-Manganeso (Fe/Mn) indica cambios en el estado de oxidación en el fondo del lago asociados a procesos de mezcla de las aguas y a la profundidad de columna de agua¹⁴. La relación Bromo-Titanio (Br/Ti) y el Carbono Orgánico se relaciona con la productividad biológica en el lago^{3,15,16}. El Titanio, aportado por los minerales transportados por afluentes, es indicador de la intensidad de la escorrentía. La incorporación de carbonato (CaCO₃) en los sedimentos de Vichuquén es mayoritariamente **endógeno**, es decir, se ha formado en el propio lago, aunque durante los últimos 100 años su incorporación al sedimento es más compleja y parece existir una mezcla que proviene de la productividad biológica, el aporte desde la cuenca y posiblemente la formación endógena debido a cambios en el balance hídrico del lago. El nitrógeno total muestra un abrupto aumento de hasta un orden de magnitud a partir de 1950 d.C. que coincide con el inicio de la plantación y cultivo intensivo de pino insignis (*Pinus radiata*) lo que tuvo un fuerte impacto en la cuenca. El Arsénico (As) se detecta a partir de 1.500 d.C. y aumenta progresivamente hasta el presente, un reflejo de la contaminación. La interpretación conjunta de estos indicadores que dependen tanto del clima local como de los aportes desde la cuenca al lago y, por tanto, de la actividad humana, permite obtener una visión general de los cambios ambientales que han sucedido en el lago a lo largo del tiempo.

2.1 Choque de culturas y el impacto humano en los ecosistemas litorales

En el contexto de la ocupación Inca, Guevara (1925)¹⁷ y Echaiz (1957)¹⁸ describen la zona de Vichuquén como un lugar con cierta jerarquía, un espacio ritual y una vía de comunicación. La zona de Vichiquen habría formado parte del territorio de los **Promaucaes** quienes, aunque no se integraron al Estado Inca, en el siglo XV-XVI, habrían recibido en sus territorios alguna **colonia de mitimaes**¹³ controladas por el Estado. Vichuquén en quechua significa “lugar lejano de difícil acceso” o “camino tortuoso”, lo que hace suponer cierto intercambio cultural consolidado entre el Estado y estas comunidades locales antes de la invasión europea. A diferencia de los que ocurrió en otras zonas andinas controladas por el Estado, durante la época Inka no parecen haberse intensificado las prácticas de cultivo agrícola y de producción de orfebrería en Vichuquén. En el registro sedimentológico del lago, esta aceleración de la economía tampoco es evidente. En otras palabras, en épocas anteriores a 1500 d.C no se verifica impacto humano debido a cambios o intensificación en el uso de la cuenca. Hacia fines de 1570 d.C. la región de Vichuquén se transformó en un espacio indígena diverso y fragmentado en términos socio-territoriales, incluido dentro de la organización colonial española¹³. Las cédulas de encomiendas de 1552 d.C. nos permiten estimar la población prehispánica en Chile central, la encomienda indígena de Juan de Cuevas –encomendero de Vichuquén– entregada por Pedro de Valdivia, comprendía una cantidad importante de mano de obra proveniente de distintas zonas de Chile central, que se ha estimado en 1.047 habitantes de los cuales 91 pertenecían a la zona de Vichuquén¹³. Los trabajos encomendados en 1579 d.C. a los Promaucaes de Vichuquén, incluía la agricultura, minería, tala de bosque, trabajos en las viñas del encomendero y actividades relacionadas con la extracción de oro. El incipiente incremento de arsénico en el registro sedimentológico de Vichuquén durante este periodo podría tener su origen en el desarrollo de estas actividades agrícolas y mineras durante los siglos XVI a XVII.

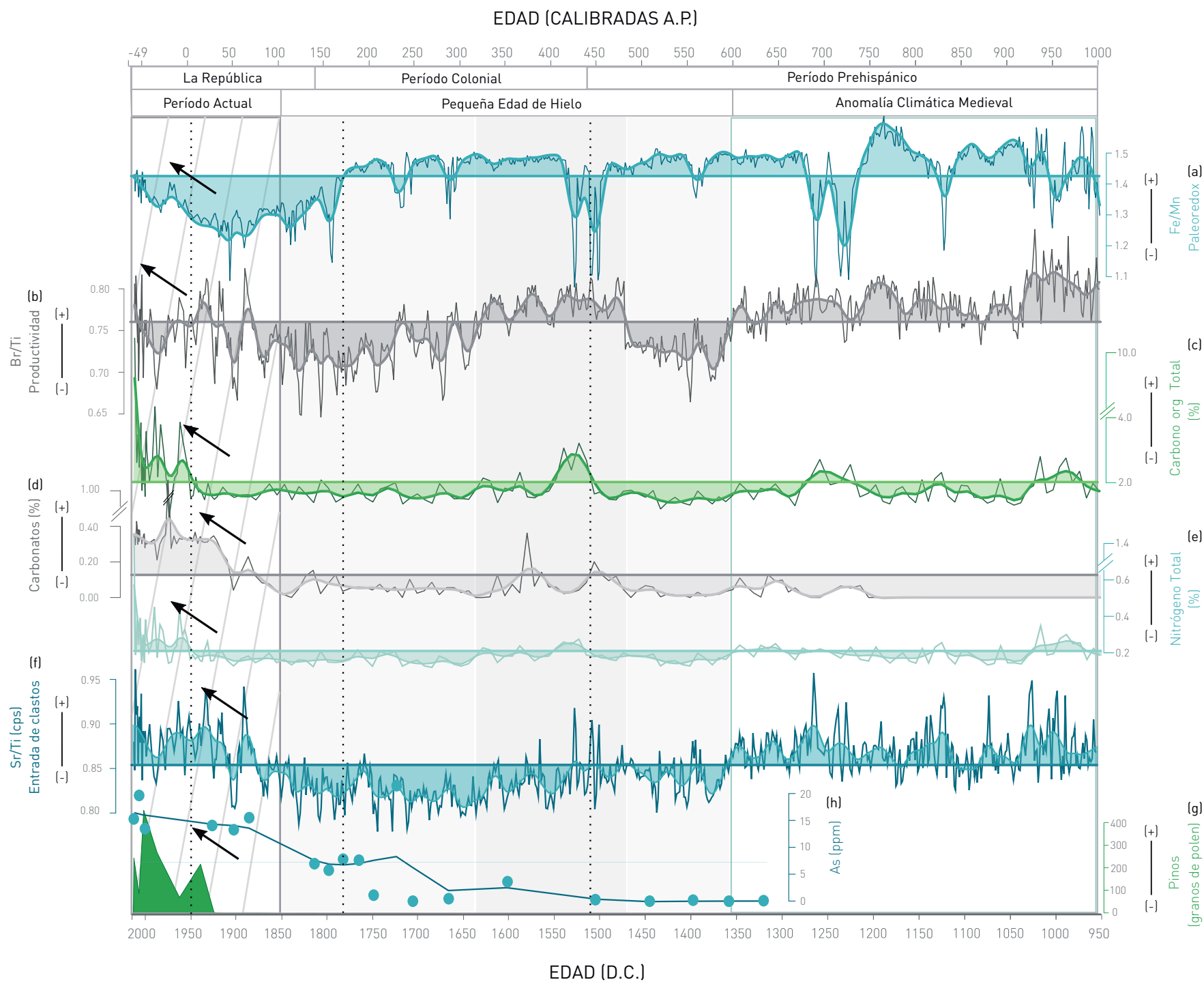


Figura 1. Evolución de los indicadores geoquímicos en el registro de Vichuquén durante los últimos 1.000 años. Estos revelan una tendencia (flechas negras) sin precedentes hacia fines del siglo XX y comienzos del siglo XXI. El lago actualmente tiene los niveles más altos de carbono orgánico total, nitrógeno, carbonatos y arsénico (puntos turquesa) que durante todo el milenio anterior. (a) Relación Hierro-Magnesio (Fe/Mn) indicador de las condiciones redox del sedimento en el momento de sedimentación; (b) Relación Bromo-Titanio (Br/Ti) indicador de la productividad orgánica total en el lago; (c) Porcentaje de Carbono orgánico total; (d) Porcentaje de Carbonato total en los sedimentos del lago; (e) Porcentaje de Nitrógeno total en el sedimento; (f) Relación Estroncio-Titanio (Sr/Ti) indicador del tamaño de los detritos y clastos en la matriz inorgánica en el sedimento; (g) Numero de granos de polen de Pino en el sedimento; (h) Concentración de Arsénico (As) en el sedimento en partes por millón (ppm)

Los mayores cambios que se registran en Vichuquén desde el siglo XV ocurren a partir de mediados del siglo XIX y parecen obedecer a forzamientos climáticos, aunque no se descarta un impacto humano menor debido a la caza, el uso del bosque, la agricultura y la minería. Durante la ACM –aquí definida entre 900 y 1.350 d.C– el mayor cambio se observa en un incremento de la productividad orgánica (valores más elevados de Br/Ti) y en la entrada de detritos de mayor tamaño (mayor susceptibilidad magnética). Condiciones más cálidas y secas pudieron generar este incremento en la bioproductividad y el ingreso de detritos de mayor tamaño, debido a un descenso en el nivel del lago, desarrollo de ambientes litorales más productivos y mayor erosión de la cuenca. Estas condiciones climáticas coinciden con otros registros lacustres de Chile central^{19, 11, 20}, que sugieren condiciones cálidas y secas durante la ACM. Justamente esta condición se invierte durante la PEH, con condiciones generalmente más frías y húmedas. Sin embargo, entre ~1500 y 1700 d.C el registro parece tener un retorno a condiciones más cálidas similares a la ACM indicadas especialmente por el incremento en la razón Br/Ti. Estas tres fases térmicas (frío-cálido-frío) de la PEH se han descrito en otros registros de Chile central aunque su generalización todavía está en discusión^{15,21}.

2.2 El periodo colonial y la República de Chile

Durante el siglo XVII y hasta el final del XVIII la localidad de Vichuquén se constituye como unidad territorial bien definida por la ocupación hispana y la producción se orienta al ganado mayor (principalmente vacuno), a la siembra de cereal y a la producción de sal¹³. Este cambio en la producción, sin embargo, tampoco parece haber generado un impacto importante en el registro sedimentológico de Vichuquén, probablemente debido a que las actividades eran a pequeña escala. La mayor modificación en el registro no comienza hasta la segunda mitad del siglo XVIII con un descenso notable de los valores de la relación Fe/Mn y el incremento sostenido de Sr/Ti y el As, que sugieren cambios en el estado de oxigenación del fondo del lago y un uso más intensivo

del suelo con mayores aportes desde la cuenca (Figura 1). Antecedentes históricos sobre la explotación del bosque nativo que generaron grandes incendios en la región, durante la llamada “Pacificación de la Araucanía”, podrían explicar este marcado cambio que ocasionó una alteración del paisaje relegando al bosque nativo a zonas altas en cerros y cordilleras. Este proceso pudo haber afectado la composición de los sedimentos del Lago Vichuquén entre el siglo XVIII y hasta mediados del XIX^{18,22}.

El mayor cambio en el registro de Vichuquén ocurrió, sin duda, en los últimos 100 años (los 24 cm superiores de la secuencia sedimentaria). Estas variaciones en los indicadores geoquímicos parecen estar asociados a cambios hidrológicos en la cuenca debido posiblemente al remplazo de los cultivos de maíz por plantaciones extensivas de Pino –que fue introducido a Chile en 1890²³– y que actualmente cubren toda la cuenca de Vichuquén. Este cambio en el uso del suelo es común en toda la zona centro-sur de Chile generada por los incentivos de la ley de Bosque de 1932 que impulsó el desarrollo de la industria maderera en Chile^{24,25,23}, a lo que se sumó el Decreto de ley N° 701, de 1974, a través del cual el Estado chileno bonificó y entregó franquicias tributarias a la plantación privada de pinos y eucaliptus²⁶. A lo anterior se suma que en los últimos 20 años la expansión inmobiliaria en la costa del lago ha aumentado los vertidos y probablemente causado el aumento en su bioproductividad hasta alcanzar valores nunca antes registrados. La eutrofización es un problema generalizado en los sistemas lacustres y de agua dulce en Chile central.

3. Desafíos futuros en el litoral de Chile central

El registro de Vichuquén aporta una perspectiva temporal de largo plazo sobre los cambios generados por factores climáticos a los que se suma el impacto humano en los ecosistemas costeros de Chile central. La zona de Vichuquén, actualmente, enfrenta serios problemas de eutrofización y contaminación de sus lagos (Laguna Torca, Lago Vichuquén, Laguna Tilicura y Laguna de Agua Dulce),



Vista de las casas que rodean el Lago de Vichuquén. En página opuesta arriba, vista panorámica del incendio de enero del 2017 desde el mirador del pueblo de Vichuquén. Este incendio es el mayor registrado históricamente en Chile central. Se asocia a la acción del hombre y a la actual "megasequía" que enfrenta el centro del país desde los últimos ocho años. Abajo se muestra la nube de cenizas dejadas por este incendio sobre el Lago de Vichuquén. Fotos Equipo PaleolPE



eventos de sequías extremas, incendios forestales, riesgos de inundación por el incremento en el nivel del mar y constante presión debido al turismo. La magnitud de la modificación del paisaje por causa humana a partir del Antropoceno en mitad del siglo XIX, no se compara con el impacto en los ecosistemas por parte de las sociedades coloniales prehispánicas. Los resultados sedimentológicos muestran que la modificación del paisaje y su impacto en el ecosistema de Vichuquén ocurre a partir de la segunda parte del periodo Colonial (siglo XVIII) exacerbado luego con la expansión socio-económica de la República de Chile desde el siglo XIX. Desde entonces se ha generado el mayor cambio documentado en toda la historia del Lago Vichuquén en los últimos 1.000 años. Algunos de los cambios recientes son comparables con los que ha acumulado el lago en sus 1.200 años de existencia desde que se cerrara su conexión directa con el Océano Pacífico³. Otros –como la eutrofización y el aumento de los aportes de sedimentos por la deforestación del bosque nativo– no tienen paralelo en la historia del lago.

Para implementar políticas de mitigación y conservación de los ecosistemas litorales es necesario establecer si se ha sobrepasado el rango de la variabilidad natural en cada uno de los cambios observados en estos ecosistemas acuáticos. Estudios paleoambientales sobre las sinergias entre variabilidad climática y actividad humana en los sistemas lacustres, ponen de manifiesto la importancia de conocer la dinámica de largo plazo para entender los cambios actuales, para afrontar y prevenir mayores impactos futuros. Los principales desafíos para la preservación de los sistemas costeros son el control de la eutrofización, el aumento en la frecuencia de blooms de algas y cianobacterias, la contaminación por metales pesados, a lo que se agrega la incertidumbre asociada a mega sequías, incendios forestales y al cambio en la dinámica del nivel del mar. Para responder a estos problemas –y darles soluciones a corto y mediano plazo– es necesario conectar el conocimiento acerca de la historia de estos ecosistemas con procesos de monitorización y reducir los factores que influyen en las transformaciones que serán agravadas debido al cambio global.

REFERENCIAS CITADAS

- 1 Jahnke, R. Global synthesis, in Carbon and Nutrient Fluxes. En: Continental Margins: A Global Synthesis, Liu, K.-K., Atkinson, L., Quinones, R. & Talaue-McManus, L. (eds) pp. 597–616. Springer, New York (2010).
- 2 Levin, L. A., Liu, K. K., Emeis, K. C., Breitburg, D. L., *et al.* Comparative biogeochemistry–ecosystem–human interactions on dynamic continental margins. *Journal of Marine Systems* 141, 3-17 (2015).
- 3 Frugone-Álvarez, M., Latorre, C., Giralt, S., *et al.* A 7,000 yr high-resolution lake sediment record from coastal Central Chile (Lago Vichuquén, 34°S): implications for past sea level and environmental variability. *Journal of Quaternary Science* DOI:10.1002/jqs.2936 (2017).
- 4 Graham, N. E., Ammann, C. M., Fleitmann, D., Cobb, K. M. and Luterbacher, J. Support for global climate reorganization during the “Medieval Climate Anomaly”. *Climate Dynamics* 37(5-6), 1217-1245 (2011).
- 5 Graham, N. E., Hughes, M. K., Ammann, C. M. *et al.* Tropical pacific – mid-latitude teleconnections in medieval times. *Climatic Change* 83, 241–285. 182, 228 (2007).
- 6 Trouet, V., Esper, J., Graham, N. E., Baker, A., Scourse, J. D. and Frank, D. C. Persistent positive North Atlantic Oscillation mode dominated the medieval climate anomaly. *Science* 324, 78-80 (2009).
- 7 Miller, G. H., Geirsdóttir, Á., Zhong, Y., Larsen, D. J., Otto Bliesner, B. L., Holland, M. M., Bailey D. A., Refsnider K. A., Lehman S. J., Southon J. R., Anderson, C., Bjornsson H. and Thordarson T. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks. *Geophysical Research Letters*, 39(2) (2012).
- 8 de Jong, R., von Gunten, L., Maldonado, A. and Grosjean, M. Late Holocene summer temperatures in the central Andes reconstructed from the sediments of high-elevation Laguna Chepical, Chile (32° S). *Climate of the Past* 9, 1921 (2013).
- 9 Martel-Cea, A., Maldonado, A., Grosjean, M., Alvial, I., de Jong, R., Fritz, S. C. and von Gunten, L. Late Holocene environmental changes as recorded in the sediments of high Andean Laguna Chepical, Central Chile (32° S; 3050ma. sl). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 461, 44-54 (2016).
- 10 Jenny, B., Valero-Garcés, B. L., Villa-Martinez, R., Urrutia, R., Geyh, M. and Veit, H. Early to mid-Holocene aridity in central Chile and the southern westerlies: the Laguna Aculeo record (34° S). *Quaternary Research* 58, 160-170 (2002).
- 11 von Gunten, L., Grosjean, M., Rein, B., Urrutia, R. and Appleby, P. A quantitative high-resolution summer temperature reconstruction based on sedimentary pigments from Laguna Aculeo, central Chile, back to AD 850. *The Holocene* 19, 873-881 (2009).
- 12 Vega, A. Asentamiento y territorialidad indígena en el partido del Maule en el Siglo XVI. *Historia* N°32, Santiago, 685-708 (1999).
- 13 Odone, M. C. El Pueblo de Indios de Vichuquén: Siglos XVI y XVII. *Revista de Historia Indígena*, Departamento de Ciencias Históricas, Universidad de Chile, N°3, pp 19-37 (1998).
- 14 Naeher, S., Gilli, A., North, R. P., Hamann, Y., Schubert, C. J. Tracing bottom water oxygenation with sedimentary Mn/Fe ratios in Lake Zurich, Switzerland. *Chemical Geology* 352,125–133 (2013).
- 15 Carrevedo, M. L., Frugone, M., Latorre, C., Maldonado, A., Bernárdez, P., Prego, R., Cardenas, D. and Valero-Garcés, B. A 700-year record of climate and environmental change from a high Andean lake: Laguna del Maule, central Chile (36° S). *The Holocene* 25, 956-972 (2015).
- 16 Gilfedder, B. S., Petri, M., Wessels, M. and Biester, H. Bromine species fluxes from Lake Constance’s catchment, and a preliminary lake mass balance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 3385-3401 (2011).
- 17 Guevara, T. *Historia de Chile Prehispánico*. Universidad de Chile, Santiago (1925).
- 18 Echaiz, R. L. *Historia de Curicó*, Volumen 1. Santiago, Neupert (1968).
- 19 Torres, L., Parra, O., Araneda, A., Urrutia, R., Cruces, F. and Chirinos, L. Vegetational and climatic history during the late Holocene in Lake Laja basin (central Chile) inferred from sedimentary pollen record. *Review of Palaeobotany and Palynology* 149, 18-28 (2008).
- 20 Villa-Martínez, R., Villagrán, C., Jenny, B. The last 7500 cal yr BP of westerly rainfall in Central Chile inferred from a high-resolution pollen record from Laguna Aculeo (34° S). *Quaternary Research*, 60, 284-293 (2003).
- 21 Caniupán, M., Lamy, F., Lange, C. B. *et al.* Holocene sea-surface temperature variability in the Chilean fjord region. *Quaternary Research*, 82, 342-353 (2014).
- 22 Ediciones La Prensa. Vichuquén: 400 años. Curico. Pp 255 (1985).
- 23 Gibson, I.A.S. Dothistroma blight of Pinus radiata. *Annual Review of Phytopathology*, 10, 51–72 (1972).
- 24 Armesto, J., Villagrán, C., Donoso, C. La historia del bosque templado chileno. *Ambiente y Desarrollo*, 10, 66-72 (1994).
- 25 Haig, I.T. *Forest Resources of Chile as a Basis for Industrial Expansion*. Corfo. Washington : Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture (1946).
- 26 Salas, C. F. Decreto Ley 701 de 1974 y Ley 19.561. *Temporada Agrícola* 11, 1-16 (1998).

GLOSARIO

Márgenes continentales oceánicos. Posición del fondo oceánico adyacente a los continentes que incluyen desde la línea costera hasta el talud continental.

Sistemas frontales ciclónicos. Lluvias generadas por la diferencia de presión de dos masas de aires de diferente temperatura que se ponen en contacto donde el desplazamiento de una provoca la ascensión frontal del aire cálido y húmedo sobre el aire frío generando un desplazamiento tipo remolino del frente de lluvias.

Anticiclón del Pacífico Sur. Sistema de alta presión del Pacífico Sur con una circulación de vientos de sur a norte que genera tiempo atmosférico fresco y claro con condiciones áridas y semi áridas en entre los 10° y 40° Sur.

Anomalía Climática Medieval. Período climático entre 1350 y 1850 d.C. que presenta desviaciones significativas de temperaturas y precipitación con respecto a la media climatología histórica en gran parte del planeta

Pequeña Edad de Hielo. Período climático generalmente más frío y seco que la media histórica en gran parte del planeta.

Oscilación del Atlántica Norte. Anomalía climática en el norte del océano Atlántico causado por la diferencia de presión atmosférica entre las baja islandesa y la alta de Azores que tiene efecto sobre el tiempo y el clima de Norteamericana y Europa, principalmente.

El Niño Oscilación del Sur. Anomalía climática con un patrón de 2 a 7 años la que consiste en una irregularidad cuasi-periodica en la velocidad de los vientos, la temperatura superficial del océano y la atmosfera sobre el Este del Océano Pacífico tropical. La fase cálida se conoce como fenómeno de El Niño y la fase fría como el fenómeno de La Niña.

Acuerdo de París. Es el pacto político y económico en el marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que viene a reemplazar el protocolo de Kioto que tiene vigencia hasta el 2020 y pretende reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) para mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C con respecto a niveles preindustriales, aumentar adaptación al Cambio Climático y mantener las corrientes financieras para un desarrollo sustentables y resiliente con el ambiente manteniendo una baja emisión de GEI.

Antropoceno. Época iniciada, convencionalmente, a mediados del siglo XIX, cuando se verifica un impacto global de las actividades humanas en la geología y ecosistemas del planeta.

Carbonato Endógeno: Carbonato de calcio que se genera en el interior del lago.

Promaucaes. Grupo indígena Mapuche de Chile Central, que habitaban los territorios entre los ríos Maipo y el Itata.

Colonia de mitimaes. Grupo de indígenas destinados por el Estado Inca a cumplir funciones económicas, socioculturales y/o militares en territorios anexados al imperio, lo que formaba parte de sistema de tributación de las sociedades locales al Estado.

AUTORES

Miguel B. Araújo

Museo Nacional de Ciencias Naturales
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
CSIC, Madrid,
España

Cristina Armas

Estación Experimental de Zonas Áridas,
CSIC, Almería,
España

Juan J. Armesto

Departamento de Ecología
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB),
Chile

Maria Laura Carrevedo

Departamento de Ecología
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB),
Chile

Juan Carlos Castilla

Departamento de Ecología
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile,
Chile

Ricardo Coutinho

Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira,
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Arraial do Cabo,
Brasil

Teodoro Dannemann

Laboratorio de Ecoinformática,
Instituto de Conservación, Biodiversidad y Territorio,
Universidad Austral de Chile, Valdivia,
Chile

Jorge Durán

Departamento de Ciências da Vida
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade de Coimbra
Coimbra,
Portugal

Alex Enrich-Prast

Department of Thematic Studies - Environmental Change,
Linköping University, 581 83 Linköping,
Sweden
Departamento de Botânica,
Instituto de Biologia,
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Rio de Janeiro,
Brasil

Vinicius F. Farjalla

Departamento de Ecologia
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Instituto de Biologia,
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro,
Brasil

Miriam Fernández

Departamento de Ecología
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile,
Chile

Rosana Ferrero

Departamento de Ecología
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile
Centro de Ecología Aplicada y Sustentabilidad (CAPES),
Chile
Instituto de Agricultura Sustentable (CSIC)
Cordoba,
España

Matías Frugone-Álvarez

Departamento de Ecología
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB),
Chile

Magdalena Fuentealba

Departamento de Ecología
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile,
Chile

Aurora Gaxiola

Departamento de Ecología
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile,
Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB),
Chile

Stefan Gelcich

Departamento de Ecología
Centro de Ecología Aplicada y Sustentabilidad (CAPES)
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile,
Chile

Lorena Gómez-Aparicio

Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla
(IRNAS-CSIC),
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Sevilla,
España

José L. González-Andújar

Instituto de Agricultura Sustentable (CSIC)
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Cordoba,
España

Claudio Latorre

Departamento de Ecología
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB)
Chile

Mauricio Lima

Departamento de Ecología
Centro de Ecología Aplicada y Sustentabilidad (CAPES)
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile,
Chile

Sandra Magro Ruiz

Museo Nacional de Ciencias Naturales
CSIC, Madrid,
España

Antonio Maldonado

Centro de Estudios Avanzados en Zonas Aridas (CEAZA),
Instituto de Investigación Multidisciplinar en Ciencia y
Tecnología,
Universidad de la Serena, La Serena,
Chile

Olaf Malm

Laboratorio de Radioisotopos
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Universidad Federal de Rio de Janeiro (UFRJ),
Rio de Janeiro,
Brasil

Humberto Marotta

Laboratório de Ecossistemas e Mudanças Globais (LEMG/
UFF)
Instituto de Geociências
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Universidade Federal Fluminense (UFF),
Brasil

Pablo A. Marquet

Departamento de Ecología
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB),
Chile
The Santa Fe Institute, Santa Fe, NM 87501, USA

Ana Moreno

Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC,
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Zaragoza,
España

Sergio A. Navarrete

Departamento de Ecología
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile,
Chile

Verónica Ortiz

Departamento de Ecología
Facultad de Ciencias Biológicas
Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

Ananda Pascual

Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (IMEDEA)
(CSIC-UIB), Esporles,
Espanya

Josep L. Pelegrí

Departament d'Oceanografia Física i Tecnològica,
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Institut de Ciències del Mar, CSIC, Barcelona,
Espanya

Luana Pinho

Departamento de Oceanografía Química,
Universidad del Estado de Rio de Janeiro,
Maracanã-RJ,
Brasil

Aliny P. F. Pires

Departamento de Ecologia,
Instituto de Biologia,
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Rio de Janeiro,
Brasil

Francisco I. Pugnaire

Estación Experimental de Zonas Áridas,
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
CSIC, Almería,
Espanya

Alexandra Rodríguez

Center for Functional Ecology (CFE)
Science for People & the Planet
Coimbra,
Portugal

Cristina Ruano-Chamorro

Australian Research Council Center of Excellence for Coral
Reef Studies
James Cook University,
Townsville,
Australia

Ana Lúcia Santoro

Instituto de Biologia,
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Rio de Janeiro,
Brasil

Calogero Santoro

Laboratorio de Arqueología y Paleoambiente,
Instituto de Alta Investigación,
Universidad de Tarapacá, Arica,
Chile

Mário L. G. Soares

Núcleo de Estudos em Manguezais,
Faculdade de Oceanografia,
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Rio de Janeiro,
Brasil

Luara Tourinho

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,
Brasil

Anna Traveset

Institut Mediterrani d'Estudis Avançats (IMEDEA) (CSIC-
UIB), Esporles,
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Espanya

Blas L. Valero-Garcés

Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC,
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Zaragoza,
Espanya

Mariana M. Vale

Laboratório de Vertebrados,
Instituto de Biologia,
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Rio de Janeiro,
Brasil

Fernando Valladares

Museo Nacional de Ciencias Naturales
Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
CSIC, Madrid,
Espanya



Reunión del LINGlobal en Cercedilla, España 2015



AGRADECIMIENTOS

Este libro no hubiera sido posible sin el generoso aporte del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España (CSIC), la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) y la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ). Vaya para el CSIC y la PUC, instituciones fundadoras del LINCGlobal, nuestro especial reconocimiento por haber confiado en este grupo de científicos interesados en el Cambio Global y haber hecho innumerables sacrificios para mantener viva esta iniciativa. El equipo de la Dirección de Diseño de la PUC liderados por Soledad Hola fue un ejemplo de profesionalismo y compromiso con este libro, especial mención merece Catalina Fuentes una artista de las infografías cuyo compromiso y capacidad hizo la diferencia. Un especial agradecimiento al querido amigo Fernando Maldonado, cuya experiencia y sabiduría en las lides de publicar libros, la fotografía, y el diseño, fueron fundamentales para completar esta labor y por habernos abierto su casa durante los vertiginosos días que nos permitieron terminarlo. Finalmente, es necesario agradecer a Juan Carlos Castilla, Carlos Duarte y Carlos Martínez por haber tenido la visión y el empeño de crear el LINCGlobal.

Esta edición del libro
Cambio Global un mirada desde Iberoamérica
se terminó de producir en septiembre de 2018 en
Santiago de Chile.



Las transformaciones resultantes de la actividad humana durante los últimos 10.000 años, intensificadas desde mediados del siglo XX, han llegado a ser de tal magnitud que el *Homo sapiens* se ha convertido por sí sólo en la principal fuerza geofísica transformadora de alcance global. Esta novedad planetaria ha dado origen al Antropoceno, la era del cambio global inducido por nuestra propia especie.

Somos una especie exitosa. Una especie que, gracias a la evolución cultural basada en el aprendizaje social, ha pasado de estar formada por grupos de individuos cazadores-recolectores a ciudadanos urbanos globales, con una tecnología de manufactura social compleja. El problema es que en nuestro éxito puede estar la semilla de nuestro propio colapso.

Los impactos de la actividad humana sobre el planeta no son una preocupación sólo de los científicos. Los gobiernos de la mayoría de los países han expresado su preocupación y alarma. Ahora llega el tiempo de los acuerdos globales para salvar al planeta y a nosotros mismos.

Con este libro queremos llamar a la reflexión sobre la dimensión del problema que representa el cambio global y la importancia de proteger los ciclos naturales de materia y energía, y asegurar una relación más sostenible con la naturaleza. Nuestro énfasis es Iberoamérica, el ámbito en el cual los autores realizan sus investigaciones. Este libro, y las actividades científicas que aquí se describen, ha sido posible gracias a una iniciativa conjunta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España, la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) y la Universidad Federal de Río de Janeiro (UFRJ), de Brasil. Esta iniciativa se ha canalizado a través del Laboratorio Internacional de Cambio Global (LINCGlobal), que con este libro celebra diez años de existencia.

Dedicamos este libro a los jóvenes de Iberoamérica. No les entregaremos un planeta en buen estado ni una sociedad sostenible, pero esperamos dejarles al menos el conocimiento que les permita forjar ambas cosas para sus descendientes.

