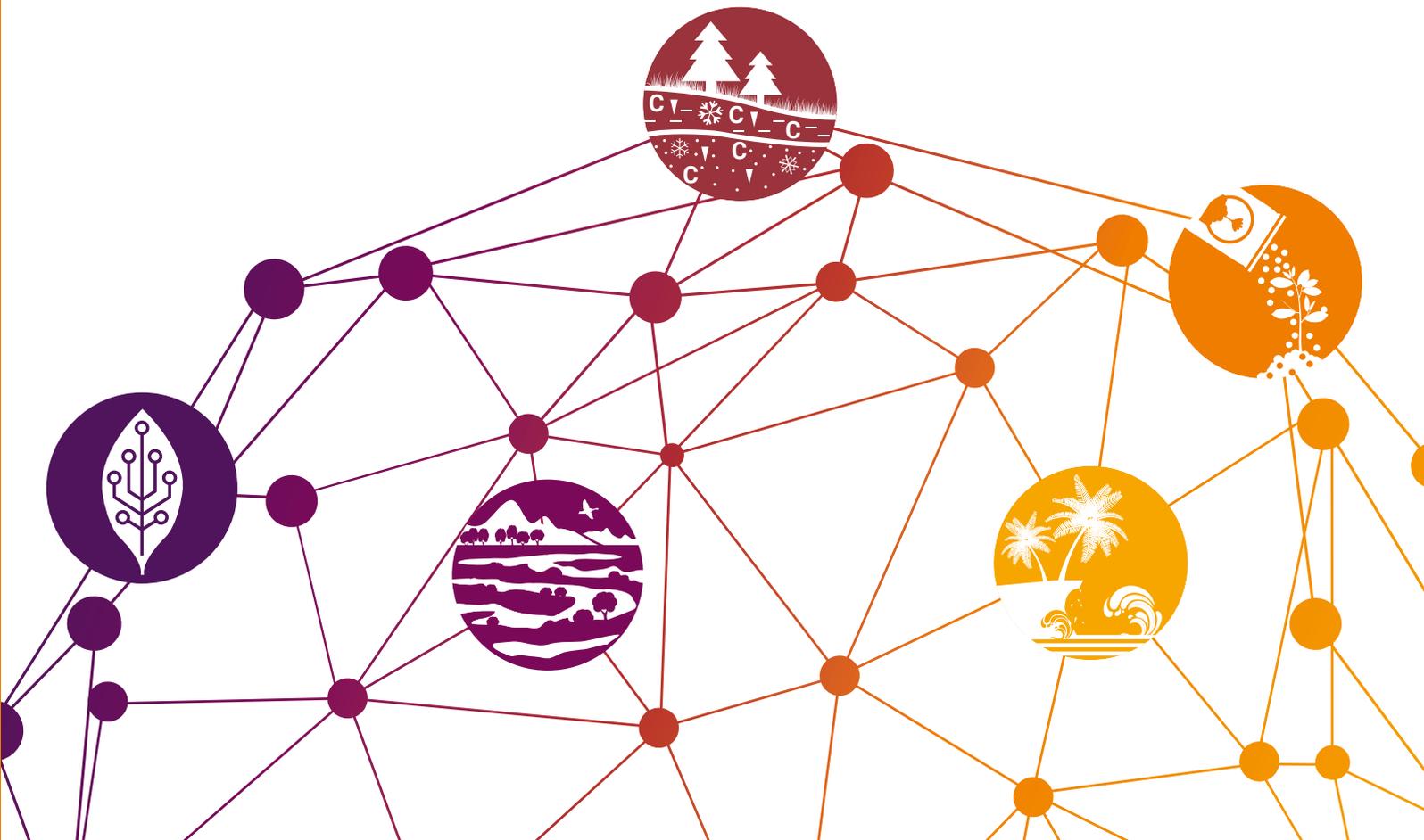


FRONTERAS 2018/19

Nuevos temas de interés ambiental



© 2019 Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
ISBN: 978-92-807-3740-0
Núm. de trabajo: DEW/2224/NA

Descargo de responsabilidad

La presente publicación puede reproducirse íntegra o parcialmente y en cualquier formato con fines educativos o sin ánimo de lucro sin el permiso específico del titular de los derechos de autor, siempre y cuando se cite la fuente. ONU Medio Ambiente agradecería recibir una copia de cualquier publicación que emplee este documento como fuente.

No se podrá utilizar la presente publicación para la reventa o con cualquier otro fin comercial sin la obtención previa de un permiso por escrito de ONU Medio Ambiente. Las solicitudes de autorización, acompañadas de una declaración del propósito y la extensión de la reproducción, deben dirigirse a: Director de la División de Comunicaciones de ONU Medio Ambiente, P. O. Box 30552, Nairobi, 00100, Kenya.

Las denominaciones empleadas en esta publicación y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no suponen juicio alguno de ONU Medio Ambiente sobre la condición jurídica de ninguno de los países, territorios o ciudades mencionados o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras. Para obtener indicaciones generales sobre el uso de los mapas contenidos en las publicaciones, visite <https://www.un.org/Depts/Cartographic/english/htmain.htm>.

La mención de una empresa o producto comercial en este documento no implica aprobación por parte de ONU Medio Ambiente. No está permitido el uso de la información de este documento relativa a productos patentados con fines publicitarios.

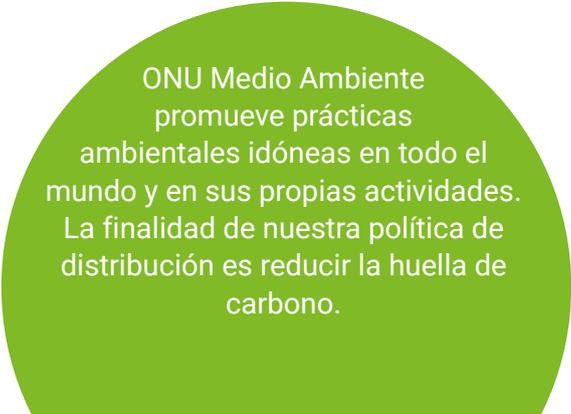
© Mapas, fotografías e ilustraciones según se especifica.

Referencia bibliográfica recomendada

PNUMA (2019). Fronteras 2018/19. Nuevos temas de interés ambiental. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Nairobi.

Producción

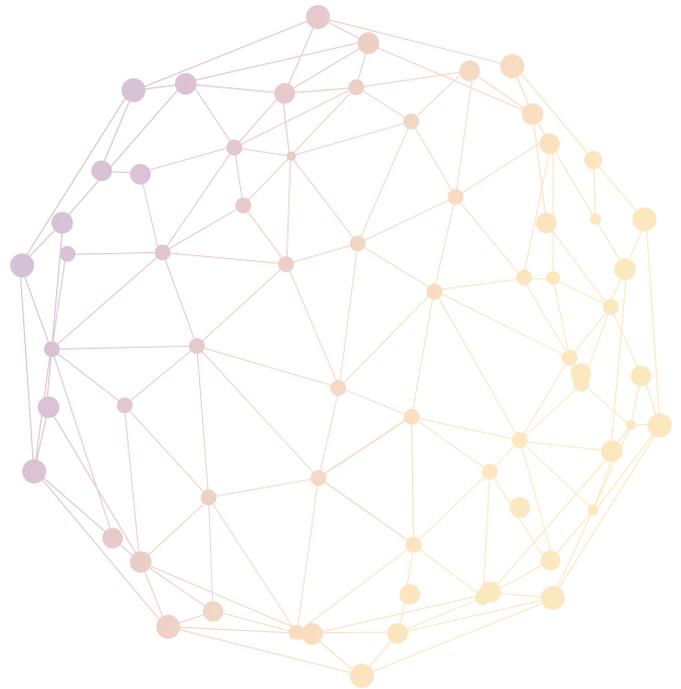
División de Ciencias
ONU Medio Ambiente
P. O. Box 30552
Nairobi, 00100, Kenya
Tel.: (+254) 20 7621234
Correo electrónico: publications@unenvironment.org
Sitio web: www.unenvironment.org/es



ONU Medio Ambiente
promueve prácticas
ambientales idóneas en todo el
mundo y en sus propias actividades.
La finalidad de nuestra política de
distribución es reducir la huella de
carbono.

FRONTERAS 2018/19

Nuevos temas de interés ambiental





Índice

	Prólogo	7
	Agradecimientos	8
	Biología sintética: rediseñar el medio ambiente	10
	Oportunidades y retos	10
	Reescribir el código de la vida	12
	Redefinición de aplicaciones: del laboratorio al ecosistema	16
	Innovar con sensatez	18
	Bibliografía	20
	Conectividad ecológica: un puente para preservar la biodiversidad	24
	Reconexión de ecosistemas fragmentados	24
	Las fuerzas de fragmentación	26
	Promoción de soluciones de conectividad	30
	Fijar metas para la conectividad del futuro	32
	Bibliografía	34
	Turberas del permafrost: pérdida de terreno en un mundo cada vez más cálido	38
	Aceleración del cambio en el Ártico	38
	Deshielo del permafrost, descomposición de las turberas e interacciones complejas	40
	Creciente sensibilización acerca de las turberas del permafrost	44
	Prioridades de conocimiento y ampliación de redes	46
	Bibliografía	48
	La fijación de nitrógeno: de la contaminación por el ciclo del nitrógeno a la economía circular del nitrógeno	52
	El reto mundial del nitrógeno	52
	Qué sabemos y qué sabemos que desconocemos del nitrógeno	54
	Fragmentación de las políticas y soluciones de la economía circular	58
	De cara a un enfoque internacional holístico del nitrógeno	60
	Bibliografía	62
	Inadaptación al cambio climático: evitar las trampas de la senda evolutiva	66
	Definición de la adaptación y la inadaptación al contexto del cambio climático	66
	La inadaptación a escala	68
	Evitar la inadaptación en un futuro limitado por los 1,5 °C	73
	Bibliografía	74



Prólogo



En la primera década del siglo xx, los químicos alemanes Fritz Haber y Carl Bosch desarrollaron un método para producir nitrógeno sintético barato a mayor escala. Su invento estimuló la producción masiva de fertilizantes nitrogenados, que transformó la agricultura mundial y también marcó el inicio de nuestra prolongada intromisión en el balance de nitrógeno de la Tierra. Se calcula que todos los años se pierden en el medio ambiente unos 200.000 millones de dólares de los Estados Unidos de nitrógeno reactivo, el cual degrada nuestros suelos, contamina nuestro aire y provoca la propagación de «zonas muertas» y floraciones tóxicas de algas en nuestros cursos de agua.

No resulta sorprendente que muchos científicos sostengan que la era geológica actual debería denominarse oficialmente «el Antropoceno». En tan solo unos decenios, la humanidad ha provocado que las temperaturas mundiales aumenten a un ritmo 170 veces superior al natural. También hemos modificado deliberadamente más del 75% de la superficie terrestre del planeta y alterado de forma permanente el caudal de más del 93% de los ríos del mundo. No solo estamos causando cambios radicales en la biosfera; ahora también somos capaces de reescribir —e incluso crear de la nada— nada menos que los componentes fundamentales de la vida.

Año tras año, una red de científicos, expertos e instituciones de todo el mundo colaboran con ONU Medio Ambiente en el descubrimiento y el análisis de nuevos temas que tendrán efectos profundos en la sociedad, la economía y el medio ambiente. Algunas de esas cuestiones están relacionadas con tecnologías novedosas que tienen aplicaciones asombrosas y riesgos inciertos, mientras que otras son perennes, como la fragmentación de los paisajes silvestres y el deshielo de suelos que llevan mucho tiempo congelados. Otro de esos temas —la contaminación por nitrógeno— es la consecuencia imprevista de decenios de actividad humana en la biosfera. En el último de los temas analizados, la inadaptación al cambio climático, se destaca que no hemos sabido adaptarnos de manera apropiada al mundo cambiante en el que vivimos.

También hay buenas noticias. Como podrá apreciar en las páginas siguientes, está comenzando a surgir un enfoque holístico para hacer frente al reto mundial de la gestión del nitrógeno. En China, la India y la Unión Europea se observan nuevas iniciativas prometedoras dirigidas a reducir las pérdidas y mejorar la eficiencia de los abonos nitrogenados. En última instancia, la recuperación y el reciclaje del nitrógeno y de otros nutrientes y materiales valiosos pueden ayudarnos a cultivar de forma limpia y sostenible, sello distintivo de una economía verdaderamente circular.

Las cuestiones analizadas en *Fronteras* deberían servir para recordarnos que, cada vez que interferimos con la naturaleza —ya sea a escala mundial o a nivel molecular—, nos arriesgamos a generar efectos de larga duración en nuestro hogar: el planeta. No obstante, si actuamos con previsión y trabajamos juntos, podemos anticiparnos a estas cuestiones y concebir soluciones útiles para todos, incluidas las generaciones posteriores.

Joyce Msuya
Directora Ejecutiva Interina
Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

Agradecimientos

Biología sintética: rediseñar el medio ambiente

Autores principales

Bartłomiej Kolodziejczyk, H2SG Energy Pte. Ltd. Singapur
Natalie Kofler, Instituto Yale de Estudios Biosféricos, Connecticut (Estados Unidos)

Colaboradores y revisores

Marianela Araya, Convenio sobre la Diversidad Biológica, Montreal (Canadá)
James Bull, Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de Texas en Austin, Texas (Estados Unidos)
Jackson Chamber, Departamento de Estadística Biológica y Biología Computacional de la Universidad de Cornell, Nueva York (Estados Unidos)
Chen Liu, Departamento de Estadística Biológica y Biología Computacional de la Universidad de Cornell, Nueva York (Estados Unidos)
Yongyuth Yuthavong, Organismo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Tailandia, Pathumthani (Tailandia)

Conectividad ecológica: un puente para preservar la biodiversidad

Autor principal

Gary Tabor, Centro de Conservación del Paisaje a Gran Escala, Montana (Estados Unidos)

Colaboradores y revisores

Maya Bankova-Todorova, Fondo Mohamed bin Zayed para la Conservación de las Especies, Abu Dabi (Emiratos Árabes Unidos)
Camilo Andrés Correa Ayram, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá (Colombia)
Letícia Couto Garcia, Universidad Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande (Brasil)
Valerie Kapos, Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación de ONU Medio Ambiente, Cambridge (Reino Unido)
Andrew Olds, Escuela de Ciencia e Ingeniería de la Universidad de Sunshine Coast, Maroochydore (Australia)
Ileana Stupariu, Facultad de Geografía de la Universidad de Bucarest (Rumania)

Turberas del permafrost: pérdida de terreno en un mundo cada vez más cálido

Autor principal

Hans Joosten, Universidad de Greifswald/Greifswald Mire Centre, Greifswald (Alemania)

Colaboradores y revisores

Dianna Kopansky, ONU Medio Ambiente, Nairobi (Kenya)
David Olefeldt, Facultad de Ciencias Agrícolas, Biológicas y Ambientales, Universidad de Alberta, Edmonton (Canadá)
Dmitry Streletskiy, Departamento de Geografía de la Universidad George Washington, Washington D. C. (Estados Unidos)

La fijación de nitrógeno: de la contaminación por el ciclo del nitrógeno a la economía circular del nitrógeno

Autores principales

Mark Sutton, Centro de Ecología e Hidrología, Edimburgo (Reino Unido)
Nandula Raghuram, Universidad Guru Gobind Singh Indraprastha, Nueva Delhi (India)
Tapan Kumar Adhya, Instituto Kalinga de Tecnología Industrial, Bhubaneswar, Odisha (India)

Colaboradores y revisores

Jill Baron, Servicio Geológico de los Estados Unidos, Colorado (Estados Unidos)
Christopher Cox, ONU Medio Ambiente, Nairobi (Kenya)
Wim de Vries, Universidad y Centro de Investigación de Wageningen, Wageningen (Países Bajos)
Kevin Hicks, Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo, York (Reino Unido)
Clare Howard, Centro de Ecología e Hidrología, Edimburgo (Reino Unido)
Xiaotang Ju, Facultad de Recursos Agrícolas y Ciencias Ambientales de la Universidad Agrícola de China, Beijing (China)
David Kanter, Facultad de Arte y Ciencia de la Universidad de Nueva York, Nueva York (Estados Unidos)
Cargele Masso, Instituto Internacional de Agricultura Tropical, Ibadan (Nigeria)

Jean Pierre Ometto, Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales, São José dos Campos (Brasil)
Ramesh Ramachandran, Centro Nacional para la Gestión Sostenible de las Zonas Costeras, Ministerio de Medio Ambiente, Silvicultura y Cambio Climático, Chennai (India)
Hans Van Grinsven, Agencia de Evaluación del Medio Ambiente de los Países Bajos (PBL), La Haya (Países Bajos)
Wilfried Winiwarter, Instituto Internacional de Análisis Aplicados de Sistemas, Laxenburg (Austria)

Inadaptación al cambio climático: evitar las trampas de la senda evolutiva

Autor principal

Catherine McMullen, Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo, Bangkok (Tailandia)

Colaboradores y revisores

Thomas Downing, Alianza Mundial de Adaptación al Clima, Oxford (Reino Unido)
Anthony Patt, Instituto de Decisiones Ambientales, Instituto Federal Suizo de Tecnología, Zúrich (Suiza)
Bernadette Resurrección, Instituto del Medio Ambiente de Estocolmo, Bangkok (Tailandia)
Jessica Troni, ONU Medio Ambiente, Nairobi (Kenya)

También deseamos transmitir nuestro profundo agradecimiento a:

Alexandra Barthelmes y Cosima Tegetmeyer, Instituto de Botánica y Ecología del Paisaje, Greifswald (Alemania); Marin Klinger, Centro Nacional de Datos sobre Nieve y Hielos, Colorado (Estados Unidos); Judith Akoth, Salome Chamanje, David Cole, Nicolien Delange, Angeline Djampou, Philip Drost, Virginia Gitari, Jian Liu, Ariana Magini, Nada Matta, Pauline Mugo, Susan Mutebi-Richards, Shari Nijman, Andreas Obrecht, Samuel Opiyo, Moses Osani, Rajinder Sian, Roxanna Samii, Nandita Surendran y Josephine Wambua, ONU Medio Ambiente.

Asesores de producción

Maarten Kappelle y Edoardo Zandri, ONU Medio Ambiente, Nairobi (Kenya)

Equipo de producción

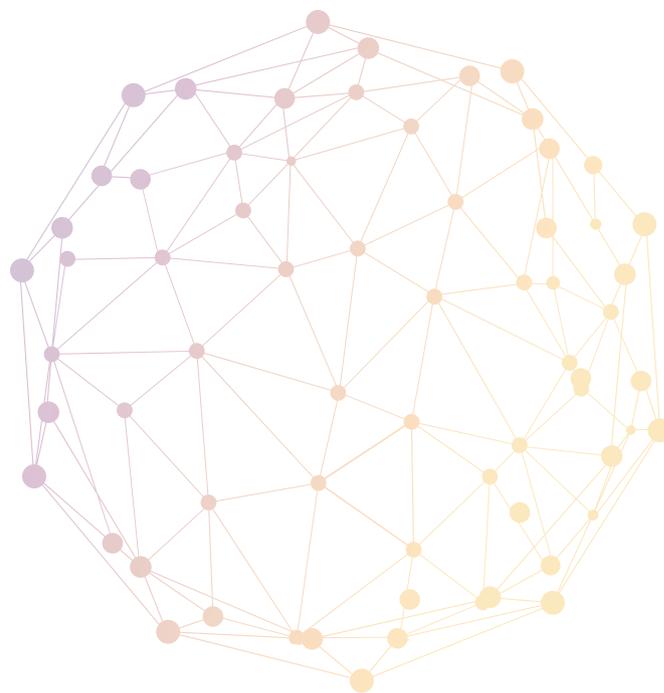
Redactora jefa: Pinya Sarasas, ONU Medio Ambiente
Asistencia técnica: Allan Lelei, ONU Medio Ambiente
Correctora: Alexandra Horton, Reino Unido

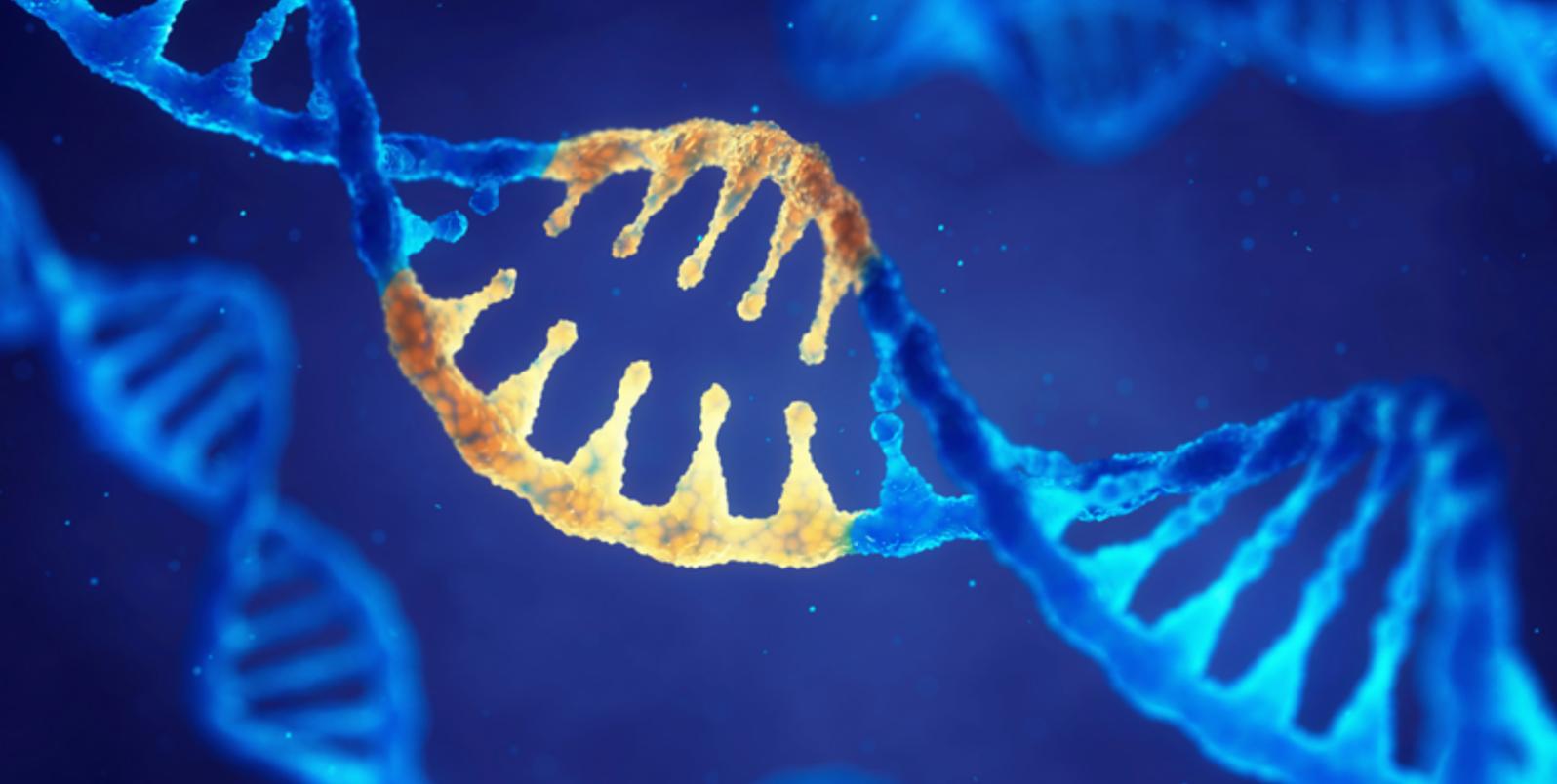
Gráficos, diseño y maquetación

Diseño gráfico: Audrey Ringler, ONU Medio Ambiente
Cartografía: Jane Muriithi, ONU Medio Ambiente

Impresión

ONUN, Departamento de Servicios de Publicación, Nairobi, con certificación ISO 14001:2004





Fotografía: nobeastsofierce/Shutterstock.com

Biología sintética: rediseñar el medio ambiente

Oportunidades y retos

El mundo se enfrenta a retos sin precedentes de cara a un futuro sano y sostenible. La destrucción del hábitat, las especies invasoras y la sobreexplotación están contribuyendo a una pérdida enorme de biodiversidad¹. Las prácticas insostenibles de la industria extractiva conllevan una carga mayor para el medio ambiente y, por ende, para el bienestar humano. Las enfermedades infecciosas transmitidas por vectores suponen una grave amenaza para la salud mundial². Es probable que el rápido cambio climático provoque la ampliación del alcance geográfico de las enfermedades tropicales y acarree una mayor presión sobre especies y ecosistemas ya debilitados³.

Varios de los enfoques concebidos para abordar esos retos —algunos en fase de propuesta, otros ya implementados— comparten una misma estrategia: dependen de la manipulación genética de organismos vivos con vistas a adquirir funciones

que de otro modo no se encuentran en la naturaleza con ánimo de cubrir necesidades del ser humano. Los científicos pueden modificar microorganismos como el *Escherichia coli* mediante la reescritura de su código genético a fin de convertirlos en diminutas fábricas vivas de biocombustible⁴. Tanto la levadura de panadería como el *Escherichia coli* pueden modificarse para producir ácido adípico —una sustancia química derivada del petróleo clave en la fabricación de *nylon*—, con lo que se obtiene una alternativa a la producción dependiente del petróleo^{5,6}. La levadura de panadería también puede reprogramarse para obtener un medicamento antipalúdico denominado «artemisinina», cuyo origen suele encontrarse en la planta del ajeno dulce⁷. Se trata de ejemplos de productos que es posible obtener gracias a la tecnología de ingeniería genética avanzada que conocemos como biología sintética.

La mayoría de los productos de biología sintética disponibles en el mercado se han desarrollado como alternativas a productos



El ácido succínico es un producto químico de gran valor que se usa en las industrias alimentaria, farmacéutica y química. El *Basfia succiniciproducens*, en la imagen, es un ácido succínico natural que produce las bacterias que se encuentran en el rumen bovino. Para producirlo a escala industrial se modifica genéticamente con ánimo de aumentar la productividad.

Fotografía: BASF

básicos de gran valor, sobre todo a los que dependen de la cadena de suministro del petróleo o de recursos no renovables⁹. También están ganando terreno en el ámbito de la investigación y en los espacios comerciales las alternativas sintéticas y los sustitutos de sustancias que suelen proceder de la naturaleza⁹⁻¹². Modern Meadow, empresa responsable de la invención de una levadura productora de colágeno, se propone producir una alternativa sostenible al cuero con una textura y propiedades semejantes a las del cuero de origen animal¹¹. Asimismo, la biología sintética ha abierto nuevas perspectivas acerca de materiales avanzados con funcionalidades y desempeños novedosos, tales como los materiales con capacidad para autoensamblarse o autorrepararse¹³.

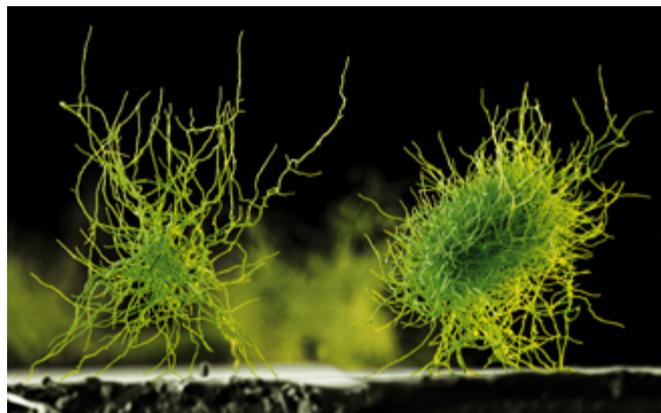
La aparición reciente de las CRISPR (repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas) como herramienta de edición génica ha posibilitado métodos todavía más precisos y asequibles para modificar organismos individuales, sistemas biológicos y genomas completos^{14,15}. Las aplicaciones de la biología sintética están progresando de la manipulación de microbios en el laboratorio al diseño de la propagación de especies fuera de entornos controlados con fines específicos. Se han propuesto estrategias consistentes en liberar en el medio ambiente organismos modificados genéticamente con ánimo de alterar de forma permanente la población de determinadas especies y, de ese modo, erradicar vectores de enfermedades, eliminar especies invasoras y dotar de resiliencia a determinadas plantas y animales en peligro¹⁶.



En el Convenio sobre la Diversidad Biológica se considera que la siguiente definición operativa constituye un punto de partida útil de cara a facilitar las deliberaciones científicas y técnicas de conformidad con el Convenio y sus Protocolos.

La **biología sintética** es un nuevo avance y una nueva dimensión de la biotecnología moderna que combina la ciencia, la tecnología y la ingeniería para facilitar y acelerar la comprensión, el diseño, el rediseño, la fabricación y la modificación de materiales genéticos, organismos vivos y sistemas biológicos²⁰.

La liberación deliberada o accidental de organismos modificados genéticamente en el medio ambiente podría tener efectos negativos significativos para la salud tanto del ser humano como del medio ambiente. Utilizar de forma indebida esas tecnologías y no rendir cuentas de sus consecuencias imprevisibles podría dar pie a daños ambientales irreversibles y notables riesgos geopolíticos¹⁷. Los efectos de la biología sintética, de alcance potencialmente amplio, hacen necesarios métodos de gobernanza y directrices para la investigación que promuevan un uso ético y responsable^{18,19}.



El hongo filamentos *Aspergillus niger* produce de forma natural enzimas con valor comercial en las industrias alimentaria y de piensos. El microorganismo se modifica genéticamente para posibilitar la producción a mayor escala de esa enzima. Aumento de 180x.

Fotografía: BASF

Reescribir el código de la vida

El desarrollo de técnicas de recombinación del ADN en la década de 1970 supuso un cambio trascendental en el modo en que el ser humano controla los genomas²¹. Las técnicas de secuenciación genética hicieron posible leer y entender los tramos de ADN, con lo que se obtuvo un modelo para diseñar genomas con nuevas expresiones génicas. Las secuencias de ADN pueden reescribirse por completo mediante la eliminación, adición o sustitución de segmentos. Ahora es posible sintetizar y ensamblar químicamente partes enteras de ADN, lo que ha propiciado la creación de vida sintética²².

La última herramienta de edición génica, CRISPR-Cas9, ha generado un entusiasmo significativo en la comunidad científica y en la opinión pública. Descrita por primera vez en 2012, CRISPR es más rápida, barata, precisa y eficiente que cualquiera de las herramientas de edición génica anteriores^{23,24}. Ha acelerado el proceso de edición, que antes requería varios meses y ahora tan solo unos días^{25,26}.

La técnica de edición génica CRISPR-Cas9 se inspira en un sistema de defensa natural con el que determinadas bacterias se protegen contra la invasión vírica^{27,28}. En el medio natural, una bacteria puede desplegar la encima Cas9 para recortar el material génico invasivo insertado por un virus, anulando así el ataque eficazmente. Los investigadores han adaptado ese mecanismo para recortar el ADN en cualquier punto. En la edición génica con CRISPR-Cas9, los científicos se sirven de un ARN guía para dirigir la enzima Cas9 a un tramo de ADN concreto. La enzima Cas9 actúa entonces como unas tijeras moleculares, recortando o eliminando el segmento en cuestión. Al aprovechar el proceso natural de reparación del ADN, los investigadores también pueden insertar un segmento de ADN modificado en la cadena alterada²⁹.

▶ Vídeo: La biología sintética



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=rD5uNAMbDaQ>
Fotografía: Omelchenko / Shutterstock.com

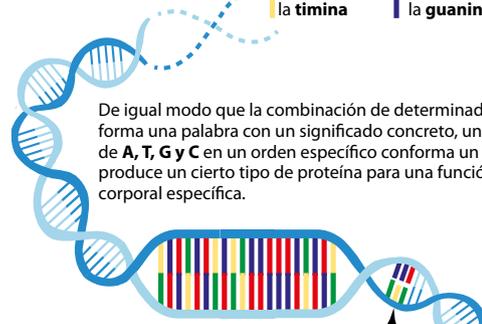
© techNyouvids

El **ADN** está presente en todo organismo vivo. Orienta la producción de las proteínas que el organismo necesita para funcionar.

El **ADN**, o ácido desoxirribonucleico, se compone de cuatro bases de ácido nucleico que se unen en pares.

La **adenina** se combina siempre con la **timina**

La **citosina** se combina siempre con la **guanina**.



De igual modo que la combinación de determinadas letras forma una palabra con un significado concreto, una cadena de **A, T, G y C** en un orden específico conforma un gen que produce un cierto tipo de proteína para una función corporal específica.

Cuando en la secuencia de ADN se produce una «errata» o mutación, esta afecta a la estructura y función de las proteínas sintetizadas. Una célula puede convertirse en cancerígena debido a «errores» en la secuencia de ADN.

Los científicos son capaces de determinar el orden preciso de las letras de la **secuencia de ADN**. El conjunto completo del ADN humano, o genoma humano, se compone de 3.000 millones de combinaciones o pares de base.



2.700 millones de pares de base



651 millones de pares de base

12 millones de pares de base (levadura de panadería, *S. cerevisiae*)



278 millones de pares de base

Las técnicas de modificación genética se utilizan desde hace decenios para modificar organismos mediante la reubicación de materiales genéticos; por ejemplo, en los organismos modificados genéticamente, en los que un gen de una especie se aísla y transfiere a otra especie distinta con ánimo de obtener una característica deseada en el organismo destinatario.

La **biología sintética** constituye el siguiente nivel de la ingeniería genética: la investigación ya no se limita a la manipulación de material genético natural, sino que abarca la programación y construcción de nuevos sistemas biológicos por medio de ADN sintetizado de manera artificial.



En 2010, un grupo de científicos anunciaron que habían logrado crear la primera célula bacteriana sintética, después de dedicar un decenio a aprender a diseñar, sintetizar y ensamblar desde cero una secuencia de ADN.



Usando como modelo el genoma natural de la levadura de panadería, un consorcio de científicos trabaja ahora en la construcción de una célula de levadura formada en su totalidad por ADN sintético.



Las esporas esféricas que produce el hongo *Emericella nidulans* están recubiertas por una capa de la proteína hidrofóbica, que repele el agua. El gen responsable de la producción de hidrofobina se ha introducido en la bacteria *Escherichia coli* para producir la proteína con aplicaciones comerciales. Aumento de 400x

Fotografía: BASF

Este proceso de edición puede compararse con la localización y eliminación de una palabra u oración específica de un documento y, si se desea, su sustitución por un nuevo elemento. Las CRISPR ya se utilizan para reparar mutaciones causantes de enfermedades en los seres humanos, dotar de nuevos atributos a los cultivos y sintetizar nuevos microorganismos¹⁴. Entre los avances más recientes se encuentra el uso de CRISPR-Cas13 para editar ARN, en lugar de ADN³⁰.

La edición génica con CRISPR se está utilizando en investigaciones sobre el diseño de organismos salvajes en entornos no controlados por el ser humano. El *impulso genético* es una aplicación de la biología sintética que depende de la edición génica con CRISPR para asegurar la expresión de las correcciones génicas deseadas en las generaciones posteriores de una especie salvaje³¹. El proceso conlleva la modificación de un organismo en el laboratorio para codificar un impulso genético basado en CRISPR y una corrección génica deseada. A continuación, ese organismo es liberado para que se reproduzca con el resto de la población en estado salvaje, con lo que se fuerza la transmisión de la corrección génica deseada junto al sistema de impulso genético en la descendencia. El impulso genético es un proceso que se autoperpetúa, pues se repite cada vez que un descendiente se reproduce con la población salvaje. Además, con el paso del tiempo, toda la población de esa especie habrá adquirido tanto la corrección génica deseada como el sistema de impulso genético. Los impulsos genéticos basados en las CRISPR también pueden garantizar la transmisión de rasgos que alteran la reproducción —por ejemplo, la esterilidad—, los cuales podrían extenderse y, quizá, provocar la extinción de la especie. La aplicación de impulsos genéticos basados en CRISPR se adecua mejor a las especies de reproducción sexual con generaciones de corta duración, como la mayoría de los insectos y ciertos roedores³².

Técnica de edición genómica CRISPR-Cas9

En el medio natural, las CRISPR-Cas9 son la estrategia de defensa e inmunidad de las bacterias frente a los ataques virales. El sistema sirve para detectar y recortar con precisión el ADN del virus invasor, con lo que se neutraliza el ataque. Los científicos han adaptado el mecanismo CRISPR-Cas9 a la edición genómica, pues es una forma más precisa, relativamente más barata y más rápida de modificar un genoma.



2

A continuación, crean una secuencia genética, denominada «ARN guía», que se adapta al tramo de ADN seleccionado, y unen el ARN guía a la enzima Cas9, que actúa como una tijera molecular.



3

El ARN guía localiza el tramo seleccionado e indica a la Cas9 dónde debe cortar.



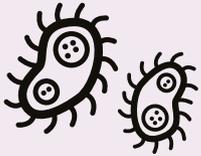
4

Posteriormente, puede insertarse un nuevo segmento de ADN en sustitución del tramo recortado.



Biología sintética

Aplicaciones en aras de la sostenibilidad



Muchas industrias han recurrido a la biología sintética: diversos microorganismos, desde bacterias hasta levaduras, son modificados genéticamente para convertirlos en fábricas en miniatura de ingredientes más sostenibles para medicamentos, vacunas, biocombustibles, productos químicos verdes y nuevos materiales.

Productos farmacéuticos



El *Escherichia coli* se manipula para producir una vacuna contra la clamidia, que se está haciendo más resistente a los antibióticos convencionales.



Productos químicos verdes y biológicos

Varias sustancias químicas presentes en productos de uso cotidiano se derivan del petróleo. La biología sintética posibilita la producción de sustancias que pueden sustituir a los productos químicos basados en el petróleo.

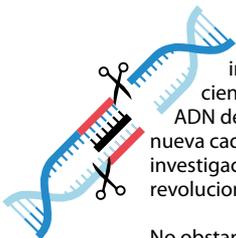
Alternativas a productos químicos derivados de fuentes insostenibles

La **sangre del cangrejo herradura** es un importante producto biomédico que se utiliza en los ensayos farmacéuticos para medir la contaminación bacteriana.



El **ácido láctico**, el **ácido succínico** y el **propanodiol** son algunos de los productos químicos generados por los microbios modificados genéticamente disponibles en el mercado mundial

Técnica de edición genómica CRISPR-Cas9



El descubrimiento del método CRISPR-Cas9 ha cambiado por completo el panorama de la investigación de la biología sintética. Gracias a él, los científicos pueden recortar un segmento concreto de ADN de una secuencia determinada o sustituirlo con una nueva cadena de ADN. Son muchos los ámbitos de la investigación médica en los que se requiere tal precisión para revolucionar los tratamientos.

No obstante, la seguridad de la técnica todavía es objeto de vigilancia, pues puede tener consecuencias indeseadas si se recorta involuntariamente ADN con una secuencia semejante a la cadena seleccionada, lo que podría desencadenar un cáncer en las células modificadas.

Mercado e inversión

13.900 millones de USD
Valor previsto del mercado mundial de las aplicaciones de biología sintética para 2022



1.900 millones de USD

2018 Inversión mundial en **empresas innovadoras** en el ámbito de la biología sintética



Biología casera

El movimiento de los denominados «ciudadanos científicos», interesados en llevar a cabo experimentos de biología sintética, ha adquirido un impulso notable en todo el mundo. Entusiastas de la biología, muchos sin experiencia científica, se reúnen en laboratorios improvisados para realizar experimentos con equipos especializados caseros y sencillos protocolos disponibles en línea.

Algunos grupos cuentan con equipos especializados y contratan a profesionales para que ayuden a los científicos ciudadanos, *biohackers* y entusiastas de la biología a desarrollar sus proyectos.

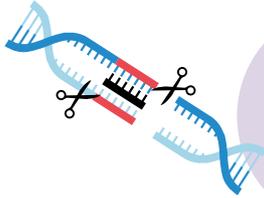
Riesgos y consideraciones en relación con las políticas

Existe la preocupación de que la biología sintética podría utilizarse para rediseñar virus patógenos con el fin de hacerlos más peligrosos, o de producir bioquímicos con recursos y modelos organizativos modestos.

La biología sintética plantea nuevos retos que es preciso afrontar mediante una acción consolidada de los órganos gubernamentales e internacionales. Es fundamental desarrollar métodos eficaces para gestionar los nuevos riesgos y garantizar así la seguridad tecnológica.

Aplicaciones para la conservación y la salud pública

Los impulsos genéticos basados en CRISPR pueden resultar claves para hacer frente a algunos retos globales como las enfermedades transmitidas por vectores y las especies invasoras. No obstante, exigen un debate social polifacético debido a su capacidad para modificar, eliminar o sustituir a toda la población de la especie seleccionada, lo cual implicaría eludir los principios fundamentales de la evolución.



Los impulsos genéticos han sido posibles gracias al desarrollo de la tecnología CRISPR-Cas9.



El castaño americano se encuentra al borde de la extinción por culpa del chancro del castaño, una micosis originaria de Asia. Si se aprueba la regulación pertinente, será posible modificar el castaño americano para hacerlo resistente a la plaga y favorecer su propagación en el medio natural.

Los impulsos genéticos con propósito de eliminación pueden forzar la transmisión de alteraciones genéticas perjudiciales como la esterilidad, de manera que podrían llegar a eliminar por completo la población seleccionada. Con el impulso de eliminación se persigue controlar la población de los mosquitos que transmiten el paludismo.



Al liberar en el medio tan solo unos cuantos organismos con impulsos genéticos, se podría transformar toda la población de la especie y, quizá, todo el ecosistema

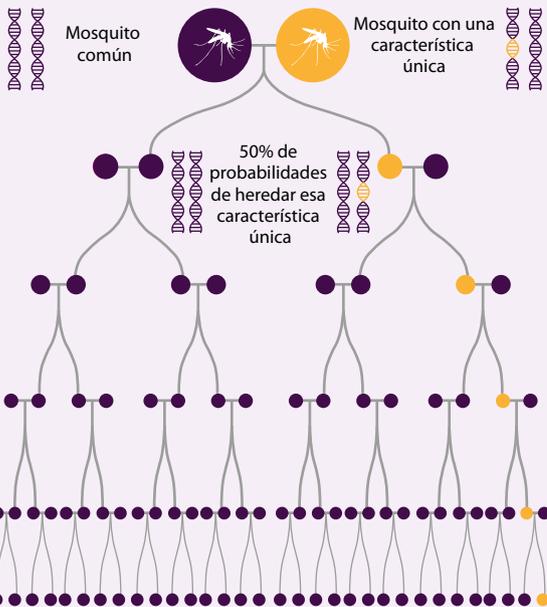


La contaminación genética cruzada entre especies y los daños ambientales no intencionados son algunas de las preocupaciones legítimas que todavía no se han resuelto

Impulsos genéticos basados en las CRISPR: manipulación de las poblaciones silvestres de flora y fauna

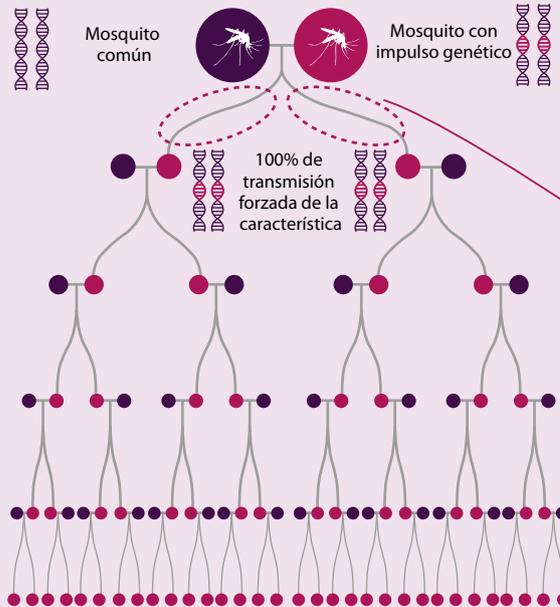
Herencia convencional

En la reproducción sexual, cada progenitor transmite la mitad de su ADN a su descendencia. Cada característica genética única del progenitor tiene un 50% de probabilidades de ser heredada por la siguiente generación. Con el paso de muchas generaciones, ese carácter genético único todavía permanece en la población, si bien con una frecuencia baja. El proceso de herencia convencional también es pertinente en el caso de la descendencia de un progenitor normal y un progenitor clásico modificado genéticamente.



Herencia del impulso genético

El impulso genético sintético elude la norma que rige la herencia genética convencional. Este mecanismo que se autopropetúa se concibe para favorecer la transmisión preferente de una característica genética modificada a las generaciones posteriores. Con el tiempo, toda la población hereda esa característica modificada preferente.



- En la fertilización, la descendencia hereda un conjunto de ADN del progenitor común y otro que porta el impulso genético equipado con CRISPR procedente del progenitor modificado genéticamente. La CRISPR-Cas9 busca el punto seleccionado del ADN común y lo recorta.
- Cuando el ADN recortado trata de reparar los daños, lo que hace es copiar la cadena modificada que contiene el impulso genético.
- De ese modo, la descendencia acaba con dos copias del ADN modificado genéticamente y con la capacidad de transmitir el impulso genético a las generaciones posteriores.

Redefinición de aplicaciones: del laboratorio al ecosistema

La biología sintética podría beneficiar indirectamente la labor de conservación, al posibilitar el desarrollo de alternativas artificiales a productos comerciales que suelen tener origen natural. Por ejemplo, la sangre del cangrejo herradura es un importante producto biomédico que se utiliza en los ensayos con productos farmacéuticos para medir la contaminación bacteriana. Su recogida insostenible está empujando a la especie hacia la extinción³³. Se ha desarrollado un sustituto sintético que podría reducir o eliminar la necesidad de extraer el cangrejo amenazado^{34,35}. De igual modo, los microbios y microalgas modificados capaces de producir alternativas a los aceites omega 3 podrían aliviar la presión sobre las mermadas poblaciones de peces salvajes³⁶.

En los últimos tiempos han surgido medidas de conservación que proponen una aplicación más directa de la tecnología en las especies seleccionadas. Liberar organismos modificados genéticamente en el medio ambiente podría restaurar la salud o aumentar la resiliencia de las poblaciones dañadas. Por ejemplo, por medio de un enfoque anterior a las CRISPR, los científicos han sintetizado el gen de oxalato oxidasa, que suele expresarse en el trigo, y han forzado su expresión en el castaño americano. Este gen es capaz de neutralizar la toxina que segrega la plaga responsable de la extinción funcional de este árbol^{37,38}. Si se aprueba la regulación pertinente, será posible plantar castaños resistentes con el propósito de recuperar esta especie, que en el pasado fue predominante en los bosques del este de los Estados Unidos. Al contrario que los cultivos genéticamente modificados, cuya contención es la principal preocupación en materia de seguridad, el castaño americano se ha diseñado de manera deliberada para que se propague y prospere en el medio silvestre.

Dado que se prevé que el cambio climático aumente los índices de extinción de especies en todo el mundo, es probable que la disponibilidad de las CRISPR agilice las aplicaciones encaminadas a la restauración de los ecosistemas³⁹. Los científicos han propuesto usar CRISPR con especies amenazadas como los corales, que están sometidos a una presión enorme debido al aumento de la temperatura, la acidificación y la contaminación de los océanos. Se están realizando estudios de prueba de concepto sobre las CRISPR con el propósito de reescribir los genomas del coral de manera que expresen mutaciones que les confieran resiliencia^{40,41}. Sin embargo, todavía están por desarrollar los marcos para la implementación sobre el terreno de esa investigación.

Las estrategias basadas en CRISPR también podrían eliminar las especies invasoras de los ecosistemas en peligro. Por ejemplo, en

▶ Vídeo: Mosquitos modificados genéticamente



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=z1STGkDYeFM>
Fotografía: Ajintai / Shutterstock.com

© biointeractive

muchas islas del Pacífico los roedores invasores están diezmando las poblaciones de aves autóctonas⁴². Mediante la colaboración internacional, el Programa de Biocontrol Genético de Roedores Invasores está desarrollando impulsos genéticos basados en CRISPR para propagar la esterilidad^{43,44}. En Nueva Zelanda se está considerando la posibilidad de usar impulsos genéticos basados en CRISPR que contribuyan a eliminar a todos los depredadores invasores para 2050⁴⁵. En Hawái se ha propuesto el uso de impulsos genéticos para reducir el paludismo de las aves propagado por los mosquitos domésticos y que ha mermado de forma grave la población de aves poco comunes^{46,47}. No obstante, estudios recientes señalan que los impulsos genéticos pueden toparse con resistencia y ser poco eficaces frente a las poblaciones de mosquitos salvajes^{48,49}.

Se ha llegado a plantear la posibilidad de resucitar a especies extintas por sus beneficios ecológicos; por ejemplo, recuperar a un animal semejante al mamut lanudo mediante la edición génica del ADN de su pariente vivo más próximo, el elefante asiático^{50,51}. Las propuestas en favor de la desextinción de especies no solo resultan sumamente cuestionables, sino que vuelven a hacer patente la importancia de hacer frente a las causas fundamentales de las extinciones. Este tipo de posibles intervenciones genéticas, pese a que no se han llevado a cabo, fomentan un debate válido sobre el modo en que la biotecnología puede impulsar los objetivos de conservación, coexistir con ellos o socavarlos⁵².

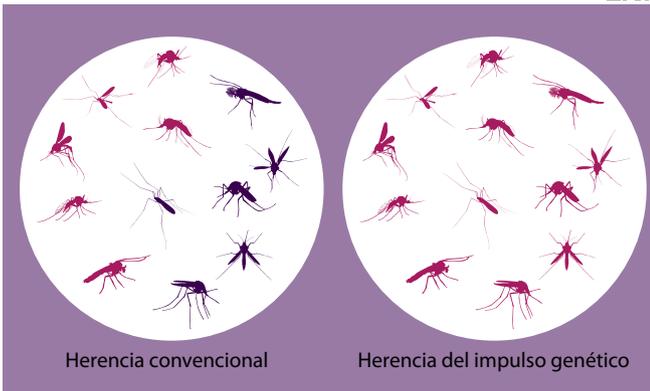


Desextinción

Las tentativas para recuperar a especies extinguidas hace poco tiempo o próximas a la extinción han empleado hasta la fecha técnicas de recreación y clonación⁵⁸⁻⁶⁰. Esos enfoques dependen de la disponibilidad de tejidos de los animales extintos, en el caso de la clonación, y de especies subsistentes que puedan cruzarse o actuar como sustituto^{61,62}. Ninguna de esas iniciativas ha dado resultado por ahora. Recuperar a especies que llevan mucho tiempo desaparecidas y de cuyo ADN apenas queda rastro solo resulta plausible de forma muy remota. Para ello sería necesario reconstruir todo su genoma y contar con una especie estrechamente relacionada para una sustitución viable. Aunque se llegaran a superar las dificultades tecnológicas, todavía existirían retos notables en relación con la adaptación de las especies desextinguidas al medio actual. Entre las preocupaciones ecológicas fundamentales cabe mencionar la incertidumbre acerca de la competencia e interacción entre especies; la vulnerabilidad de las especies desextinguidas a las enfermedades y parásitos; la posibilidad de que se conviertan en vectores de enfermedades o especies invasoras; y la probabilidad de establecer y sostener una población sana a partir de ejemplares con una baja diversidad genética⁶¹.



Video: ¿Qué es un impulso genético?



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=75iP5OLEHrU>

© STAT



Video: ¿Por qué es tan cara la sangre del cangrejo herradura?



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=LgQZWSILBnA>
Fotografía: Lysogor Romar/Shutterstock.com

© Business Insider

Con miras a reducir la carga mundial de enfermedades, varias estrategias relacionadas con la biología sintética se proponen directamente eliminar las poblaciones de los vectores de enfermedades. La empresa Oxitec ha modificado genéticamente a mosquitos para que expresen un gen sintético letal y los ha liberado en Sudamérica, Asia Sudoriental y varias naciones del Caribe con ánimo de eliminar el vector del dengue, el virus de Zika, la fiebre amarilla y el chikunguña^{53,54}. Estos mosquitos «autolimitantes» transmiten un gen letal a su descendencia que impide que alcancen la edad adulta. No obstante, se trata de un método de eliminación reversible si no se liberan ejemplares de manera continuada para mantener en el medio silvestre a la población de mosquitos modificados. Para superar esta cuestión, Target Malaria, un consorcio internacional financiado por la Fundación Bill y Melinda Gates, está desarrollando impulsos genéticos basados en CRISPR que controlen permanentemente el vector del paludismo en África Subsahariana⁵⁵. Los impulsos genéticos basados en CRISPR son sumamente invasores; en teoría, al liberar una sola vez algunos organismos dotados de impulso genético se podría eliminar por completo toda una población silvestre. Otra estrategia consiste en usar impulsos genéticos que no eliminen a la población, sino que reduzcan la capacidad de los mosquitos para transmitir patógenos⁵⁶. Asimismo, se han diseñado impulsos genéticos basados en CRISPR con ánimo de inmunizar permanentemente al ratón de patas blancas contra la enfermedad de Lyme en islas de Massachusetts (Estados Unidos)⁵⁷.

Innovar con sensatez

La liberación de organismos modificados genéticamente en el medio ambiente, accidental o deliberada, ha dado pie a motivos de preocupación válidos sobre la bioseguridad y sus consecuencias imprevisibles. Con los organismos modificados en estudios cerrados o instalaciones industriales, los procedimientos de contención y la regulación sobre la eliminación de desechos ayudan a evitar escapes, si bien no son infalibles⁶³. En lo que respecta a la liberación deliberada, los motivos de preocupación concierne a la posible contaminación cruzada entre especies, las interacciones ecológicas y las consecuencias en los ecosistemas siguen en gran medida sin resolverse⁶⁴. Alterar genéticamente al portador de una enfermedad podría provocar que el patógeno evolucione y se vuelva más virulento, o que encuentre un nuevo vector⁶⁵.

Hasta la fecha, los impulsos genéticos basados en CRISPR se han puesto a prueba solamente en poblaciones pequeñas y entornos controlados. En un experimento reciente se logró eliminar por completo en el laboratorio la población de mosquitos portadores del paludismo⁶⁶. Con vistas a realizar pruebas más amplias, Target Malaria ha obtenido autorización recientemente para liberar a 10.000 mosquitos modificados en Burkina Faso. Estos especímenes se modificarán genéticamente para esterilizarlos, pero no se los dotará de impulsos genéticos, a fin de comprobar en qué medida compiten con los machos silvestres⁶⁷. No obstante, este tipo de ensayos sobre el terreno para evaluar la eficacia del sistema de impulso genético podría acarrear riesgos intrínsecos^{68,69}.

De acuerdo con el principio de precaución, en el desarrollo y manejo de aplicaciones y productos innovadores de biología sintética se debería llevar a cabo una evaluación de riesgos rigurosa y contemplar las perspectivas de diversas partes interesadas^{19,70,71}. El principio de precaución afirma que, cuando las actividades humanas pueden causar daños inaceptables, plausibles e inciertos desde el punto de vista científico, deben tomarse medidas para evitar o reducir esos daños⁷². El concepto de equivalencia sustancial —es decir, que un organismo modificado genéticamente es tan seguro como su equivalente tradicional— suele citarse junto al principio de precaución⁷³. Algunos países aplican políticas y regulaciones amplias sobre la ingeniería y la investigación genética, mientras que otros cuentan entre sus retos principales el mal funcionamiento de los sistemas regulatorios, las deficiencias de las políticas y la capacidad para evaluar los riesgos⁷⁴⁻⁷⁷.

Se han hecho algunos intentos para detectar, evaluar y abordar las preocupaciones éticas y en materia de bioseguridad de la biología sintética. Las Academias de Ciencia, Ingeniería y Medicina de los Estados Unidos publicaron en 2016 un informe sobre los impulsos

genéticos en el que subrayan la necesidad de realizar evaluaciones rigurosas de los riesgos ambientales y de acometer un debate en el que se implique de forma rigurosa la opinión pública y que certifique los valores humanos¹⁹.

En diciembre de 2017, el grupo *ad hoc* de expertos técnicos sobre biología sintética, creado por las partes en el Convenio sobre la Diversidad Biológica, concluyó que los organismos —tanto si ya se han desarrollado como si se están desarrollando con los métodos actuales de biología sintética, incluidos los dotados de impulsos genéticos— se ajustan a la descripción de los organismos vivos modificados (OVM), que se regulan de conformidad con el Protocolo de Cartagena, jurídicamente vinculante⁷⁸. Con 171 naciones parte, el Protocolo aplica el principio de precaución y exige que cada parte adopte todas las medidas necesarias para garantizar el manejo, transporte y uso seguros de los OVM resultantes⁷⁹.

SYNBIOSAFE, un proyecto de investigación financiado por la Unión Europea, se creó con ánimo de determinar cuáles son las principales cuestiones en materia de seguridad, gestión del riesgo, ética y, notablemente, la relación entre ciencia y sociedad, que hace hincapié en la educación pública y el diálogo entre científicos, empresas, gobiernos y expertos en ética^{80,81}. Algunos desarrolladores de impulsos genéticos también han propuesto directrices para una investigación ética que destacan la necesidad de que la ciudadanía tenga una participación significativa⁸². No obstante, la liberación voluntaria de organismos modificados y su

▶ **Vídeo: ¿Por qué dejan entrar a los mosquitos en esta aldea africana?**



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=ooYShrGtKUQ>
Fotografía: Dmitry Trashchenko

© BBC News

▶ Vídeo: ¿Podrían los ratones modificados genéticamente reducir la enfermedad de Lyme?



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=FOCNixYPsI4>

© PBS NewsHour

Fotografía: Szasz-Fabian Jozsef / Shutterstock.com

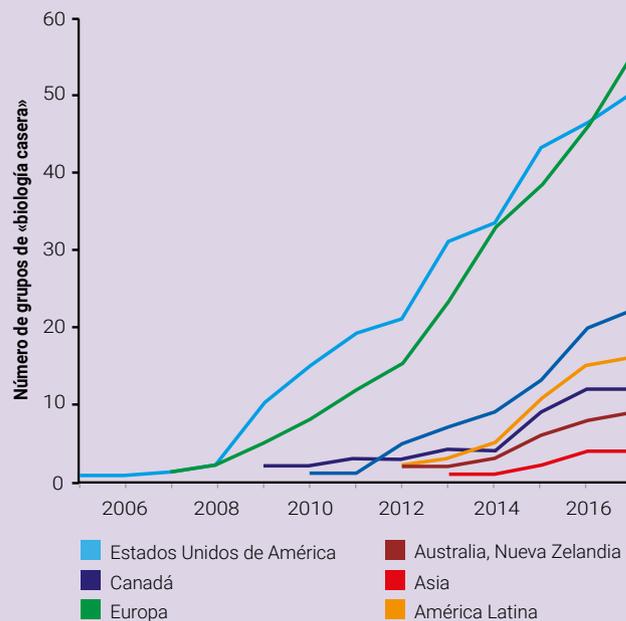
potencial para transformar de manera permanente las especies silvestres y cruzar las fronteras internacionales ponen a prueba las limitaciones de las políticas vigentes, por lo que ciertos grupos ambientales demandan una moratoria de todos los estudios sobre los impulsos genéticos⁸³. Otras preocupaciones reglamentarias se centran en el posible uso de la biología sintética con fines de ofensiva militar^{84,85}.

Es posible que los marcos éticos actuales no sean capaces de seguir el ritmo de los rápidos avances de la biología sintética y su complejidad intrínseca, sobre todo en relación con las especies silvestres⁸⁶. Las decisiones relativas a la liberación de organismos modificados en el medio natural estarán condicionadas por la ética ambiental predominante o por el modo en que una mayoría de ciudadanos se relacione con la naturaleza no humana⁸⁷. Hay quien considera que alterar el código genético de la vida silvestre supone un grave exceso por parte del ser humano, haciéndose eco de la preocupación en torno a los cultivos modificados genéticamente. Otras personas quizá creen que usar una tecnología que podría salvar vidas o restaurar ecosistemas deteriorados acarrea una responsabilidad moral⁸⁷. Para resolver las oposiciones contrapuestas de estos sistemas de valores se requiere responsabilidad en la toma de decisiones⁸⁹. Las aplicaciones de la biología sintética también plantean dudas acerca de a quién corresponde la propiedad de un OVM y su genoma, de qué protección disponen las comunidades vulnerables y cómo se garantiza que las personas más afectadas tienen voz. Es esencial que foros de deliberación equilibrados e inclusivos orienten el ámbito de la biología sintética y velen por que sus aplicaciones ambientales beneficien a todos los que compartimos este planeta.



Ciudadanos científicos, biohackers y laboratorios caseros

La biología sintética y la edición genómica han atraído el interés tanto de las empresas como de los ciudadanos de a pie. La «biología casera», es decir, el movimiento de «ciudadanos científicos» interesados en los experimentos de biología sintética, se ha convertido en un fenómeno internacional en el último decenio. A menudo con escaso conocimiento previo del campo, los entusiastas se reúnen en laboratorios improvisados para celebrar cursos acelerados de biotecnología y llevar a cabo experimentos prácticos^{90,91}. Sencillos protocolos disponibles en Internet y equipos especializados con un precio de entre 150 y 1.600 dólares de los Estados Unidos han impulsado el veloz crecimiento del movimiento. Hay laboratorios caseros en la mayoría de las grandes ciudades, y en 2017 había unos 168 grupos en todo el mundo^{87,88}. Cabe esperar que regular el uso de tecnologías de fácil acceso y bajo costo como CRISPR y los equipos de edición génica supondrá un reto para las autoridades. También aumenta cada vez más la preocupación ante la posibilidad de que terroristas den un uso indebido a la tecnología con ánimo de destruir cultivos o de convertir a microbios inofensivos en armas biológicas⁹⁴.



Fuente: The Brookings Institute⁸³

Bibliografía

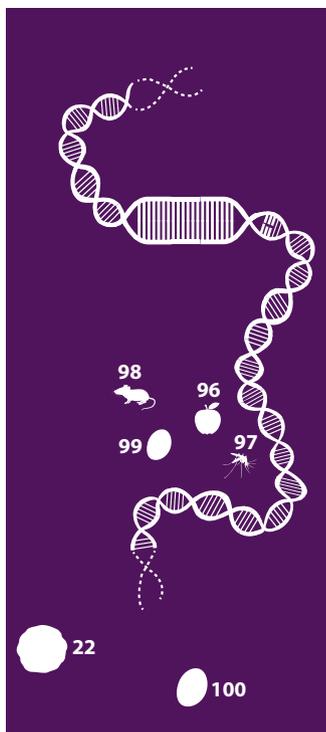
- International Union for Conservation of Nature (2018). The IUCN Red List of Threatened Species. <http://www.iucnredlist.org/>
- World Health Organization (2017). *Global vector control response 2017-2030*. Geneva. <http://www.who.int/vector-control/publications/global-control-response/en/>
- Scheffers, B.R., De Meester, L., Bridge, T.C., Hoffmann, A.A., Pandolfi, J.M., Corlett, R.T., *et al.* (2016). The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science* 354(6313), aaf7671. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7671>
- Heo, M.J., Jung, H.M., Um, J., Lee, S.W. and Oh, M.K. (2017). Controlling citrate synthase expression by CRISPR/Cas9 genome editing for n-butanol production in *Escherichia coli*. *ACS Synthetic Biology* 6(2), 182-189. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.6b00134>
- Raj, K., Partow, S., Correia, K., Khusnutdinova, A.N., Yakunin, A.F. and Mahadevan, R. (2018). Biocatalytic production of adipic acid from glucose using engineered *Saccharomyces cerevisiae*. *Metabolic Engineering Communications* 6, 28-32. <https://doi.org/10.1016/j.meten.2018.02.001>
- Averesch, N.J.H., Martínez, V.S., Nielsen, L.K. and Krömer, J.O. (2018). Toward synthetic biology strategies for adipic acid production: An *in silico* tool for combined thermodynamics and stoichiometric analysis of metabolic networks. *ACS Synthetic Biology* 7(2), 490-509. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.7b00304>
- Peplow, M. (2016). Synthetic biology's first malaria drug meets market resistance. *Nature News*, 23 February. Doi: 10.1038/530390a. <https://www.nature.com/news/synthetic-biology-s-first-malaria-drug-meets-market-resistance-1.19426>
- Kelley, N.J., Whelan, D.J., Kerr, E., Apel, A., Beliveau, R. and Scanlon, R. (2014). Engineering biology to address global problems: Synthetic biology markets, needs, and applications. *Industrial Biotechnology* 10, 140-149. <https://www.liebertpub.com/doi/pdf/10.1089/ind.2014.1515>
- McEachran, R. (2015). Creators defend vanilla flavour made using synthetic biology. *The Guardian*, 28 May 2015. <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/may/28/creators-defend-vanilla-flavour-made-using-synthetic-biology>
- Bhanawase, S.L. and Yadav, G.D. (2017). Novel silica-encapsulated Cu-Al hydrotalcite catalyst: oxidative decarboxylation of vanillyl mandelic acid to vanillin in water at atmospheric pressure. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 56(45), 12899-12908. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.6b04982>
- Purcell, B.P., Williamson, D.T., Marga, F.S., Shofer, S.J. and Cassingham, D.M. (2016). Method for making a biofabricated material containing collagen fibrils. International Patent Application No. PCT/US2017/017889, filed 15 February 2017. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2017142896&tab=PCTBIBLIO&maxRec=1000>
- Amyris (2018). *Amyris Aprinnova joint venture launches pharmaceutical grade Neosance Squalane USP — opens new market among FDA regulated products*. 8 February. <http://investors.amyris.com/news-releases/news-release-details/amyris-aprinnova-joint-venture-launches-pharmaceutical-grade>
- Le Feuvre, R.A. and Scrutton, N.S. (2018). A living foundry for synthetic biological materials: a synthetic biology roadmap to new advanced materials. *Synthetic and Systems Biotechnology*, 3, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2018.04.002>
- Barrangou, R. and Doudna, J.A. (2016). Applications of CRISPR technologies in research and beyond. *Nat Biotechnol* 34, 933-941. <https://doi.org/10.1038/nbt.3659>
- Piaggio, A.J., Segelbacher, G., Seddon, P.J., Alphey, L., Bennett, E.L., Carlson, R.H. *et al.* (2017). Is it time for synthetic biodiversity conservation? *Trends in Ecology & Evolution* 32, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.10.016>
- Redford, K.H., Adams, W., Carlson, R., Mace, G.M. and Ceccarelli, B. (2014). Synthetic biology and the conservation of biodiversity. *Oryx* 48, 330-336. <https://doi.org/10.1017/S0030605314000040>
- Esvelt, K.M. and Gemmill, N.J. (2017). Conservation demands safe gene drive. *PLOS Biology* 15, e2003850. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003850>
- Nuffield Council on Bioethics (2012). *Emerging biotechnologies: technology, choice and the public good*. London. http://nuffieldbioethics.org/wp-content/uploads/2014/07/Emerging_biotechnologies_full_report_web_0.pdf
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016). *Gene drives on the horizon: Advancing science, navigating uncertainty, and aligning research with public values*. Washington DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23405>
- Convention on Biological Diversity (2016). Decision adopted by the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity XIII/17 Synthetic biology. 16 December. CBD/COP/DEC/XIII/17. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-13/cop-13-dec-17-en.pdf>
- Cohen, S.N., Chang, A.C.Y., Boyer, H.W. and Helling, R.B. (1973) *Construction of biologically functional bacterial plasmids in vitro*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 70, 3240-3244
- Gibson, D.G., Glass, J.I., Lartigue, C., Noskov, V.N., Chuang, R.Y., Algire, M.A. *et al.* (2010). Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome. *Science* 329(5987), 52-56. Doi: 10.1126/science.1190719. <http://science.sciencemag.org/content/329/5987/52>
- Sternberg, S.H. and Doudna, J.A. (2015). Expanding the biologist's toolkit with CRISPR-Cas9. *Molecular Cell* 58(4), 568-574. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2015.02.032>
- Jinek, M., Chylinski, K., Fonfara, I., Hauer, M., Doudna, J.A. and Charpentier, E. (2012). A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science* 337(6096), 816-821. <https://doi.org/10.1126/science.1225829>
- Kim, Y.G., Cha, J. and Chandrasegaran, S. (1996). *Hybrid restriction enzymes: zinc finger fusions to Fok I cleavage domain*. Proceedings of the National Academy of Sciences 93, 1156-1160. <http://www.pnas.org/content/93/3/1156>
- Wei, C., Liu, J., Yu, Z., Zhang, B., Gao, G. and Jiao, R. (2013). TALEN or Cas9 - rapid, efficient and specific choices for genomic modifications. *Journal of Genetics and Genomics* 40, 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2013.03.013>
- Horvath, P. and Barrangou, R. (2010). CRISPR/Cas, the immune system of bacteria and archaea. *Science* 327(5962), 167-170. <https://doi.org/10.1126/science.1179555>
- Rath, D., Amlinger, L., Rath, A. and Lundgren, M. (2015). The CRISPR-Cas immune system: Biology, mechanisms and applications. *Biochimie* 117, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025>

29. Hsu, P.D., Lander, E.S. and Zhang, F. (2014). Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering. *Cell* 157(6), 1262-1278. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.05.010>
30. Cox, D.B.T., Gootenberg, J.S., Abudayyeh, O.O., Franklin, B., Kellner, M.J., Joung, J. *et al.* (2017). RNA editing with CRISPR-Cas13. *Science* 358(6366), 1019-1027. <https://doi.org/10.1126/science.aqa0180>
31. Esvelt, K.M., Smidler, A.L., Catteruccia, F. and Church, G.M. (2014). Concerning RNA-guided gene drives for the alteration of wild populations. *eLife* 3, e03401. <https://doi.org/10.7554/eLife.03401>
32. Champer, J., Buchman, A. and Akbari, O.S. (2016). Cheating evolution: engineering gene drives to manipulate the fate of wild populations. *Nature Reviews Genetics* 17(3), 146-159. <https://doi.org/10.1038/nrg.2015.34>
33. Smith, D.R., Brockmann, H.J., Beekey, M.A., King, T.L., Millard, M.J. and Zaldivar-Rae, J. (2017). Conservation status of the American horseshoe crab (*Limulus polyphemus*): a regional assessment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 27(1), 135-175. <https://doi.org/10.1007/s11160-016-9461-y>
34. Ding, J.L. and Ho, B. (2010). Endotoxin detection - from *Limulus* amoebocyte lysate to recombinant factor C. *Subcell Biochem* 53, 187-208. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9078-2_9
35. Zhang, S. (2018). *The last days of the blue-blood harvest*. The Atlantic, May 9. <https://www.theatlantic.com/science/archive/2018/05/blood-in-the-water/559229/>
36. Sprague, M., Betancor, M.B. and Tocher, D.R. (2017). Microbial and genetically engineered oils as replacements for fish oil in aquaculture feeds. *Biotechnology Letters* 39(11), 1599-1609. <https://doi.org/10.1007/s10529-017-2402-6>
37. Newhouse, A.E., Polin-McGuigan, L.D., Baier, K.A., Valletta, K.E.R., Rottmann, W.H., Tschaplinski, T.J. *et al.* (2014). Transgenic American chestnuts show enhanced blight resistance and transmit the trait to T1 progeny. *Plant Science* 228, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.04.004>
38. Steiner, K.C., Westbrook, J.W., Hebard, F.V., Georgi, L.L., Powell, W.A. and Fitzsimmons, S.F. (2017). Rescue of American chestnut with extraspecific genes following its destruction by a naturalized pathogen. *New Forests* 48, 317-336. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016894521400079X>
39. Urban, M.C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science* 348, 571-573. <https://doi.org/10.1126/science.aaa4984>
40. Van Oppen, M.J.H., Oliver, J.K., Putnam, H.M. and Gates, R.D. (2015). *Building coral reef resilience through assisted evolution*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 2307-2313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422301112>
41. Cleves, P.A., Strader, M.E., Bay, L.K., Pringle, J.R. and Matz, M.V. (2018). *CRISPR/Cas9-mediated genome editing in a reef-building coral*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1722151115>
42. Harper, G.A. and Bunbury, N. (2015). Invasive rats on tropical islands: Their population biology and impacts on native species. *Global Ecology and Conservation*, 3, 607-6027. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.02.010>
43. Leitschuh, C.M., Kanavy, D., Backus, G.A., Valdez, R.X., Serr, M., Pitts, E.A. *et al.* (2018). Developing gene drive technologies to eradicate invasive rodents from islands. *Journal of Responsible Innovation* 5, 121-138. <https://doi.org/10.1080/232299460.2017.1365232>
44. The Genetic Biocontrol of Invasive Rodents (2018). GBIRD program. <http://www.geneticbiocontrol.org>
45. Predator free New Zealand (2018). Predator free NZ. <https://predatorfreenz.org>
46. Paxton, E.H., Camp, R.J., Gorresen, P.M., Crampton, L.H., Leonard, D.L. Jr. and VanderWerf, E.A. (2016). Collapsing avian community on a Hawaiian island. *Science Advances* 2(9), e1600029. <http://advances.sciencemag.org/content/2/9/e1600029>
47. Regalado, A. (2016). The plan to rescue Hawaii's birds with genetic engineering. *MIT Technology Review*, 11 May. <https://www.technologyreview.com/s/601383/the-plan-to-rescue-hawaiis-birds-with-genetic-engineering/>
48. Hammond, A.M., Kyrou, K., Bruttini, M., North, A., Galizi, R., Karlsson, X. *et al.* (2017). The creation and selection of mutations resistant to a gene drive over multiple generations in the malaria mosquito. *PLoS Genet* 13(10), e1007039. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1007039>
49. Shaw, W.R. and Catteruccia, F. (2018). Vector biology meets disease control: using basic research to fight vector-borne diseases. *Nature Microbiology*. <https://doi.org/10.1038/s41564-018-0214-7>
50. Zimov, S.A., Zimov, N.S., Tikhonov, A.N. and Chapin, F.S. (2012). Mammoth steppe: a high-productivity phenomenon. *Quaternary Science Reviews* 57, 26-45. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.10.005>
51. Shapiro, B. (2015). Mammoth 2.0: will genome engineering resurrect extinct species? *Genome Biology* 16, 228. <https://doi.org/10.1186/s13059-015-0800-4>
52. Kaebnick, G.E. and Jennings, G. (2017). De-extinction and conservation. *Hastings Center Report* 47(4), S2-S3. <https://doi.org/10.1002/hast.744>
53. Phuc, H.K., Andreasen, M.H., Burton, R.S., Vass, C., Epton, M.J., Pape, G. *et al.* (2007). Late-acting dominant lethal genetic systems and mosquito control. *BMC Biol* 5, 11. <https://doi.org/10.1186/1741-7007-5-11>
54. Harris, A.F., McKemey, A.R., Nimmo, D., Curtis, Z., Black, I., Morgan, S.A. *et al.* (2012). Successful suppression of a field mosquito population by sustained release of engineered male mosquitoes. *Nat Biotechnol* 30, 828-830. <https://doi.org/10.1038/nbt.2350>
55. Target Malaria (2017). Our work. <http://targetmalaria.org/our-work/>
56. Hoffmann, A.A., Montgomery, B.L., Popovici, J., Iturbe-Ormaetxe, I., Johnson, P.H., Muzzi, F. *et al.* (2011). Successful establishment of *Wolbachia* in *Aedes* populations to suppress dengue transmission. *Nature* 476, 454-457. <https://doi.org/10.1038/nature10356>
57. MIT Media Lab (2017). Preventing tick-borne disease by permanently immunizing mice. <https://www.media.mit.edu/projects/preventing-tick-borne-disease-by-permanently-immunizing-mice/overview/>
58. Folch, J., Cocero, M.J., Chesné, P., Alabart, J.L., Domínguez, V., Cogliani, Y. *et al.* (2009). First birth of an animal from an extinct subspecies (*Capra pyrenaica pyrenaica*) by cloning. *Theriogenology*, 71(6), 1026-1034. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.11.005>
59. Shapiro, B. (2016). Pathways to de-extinction: how close can we get to resurrection of an extinct species? *Functional Ecology*. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2435.12705>
60. Stokstad, E. (2015). Bringing back the aurochs. *Science*, 350, 1144-1147. <https://doi.org/10.1126/science.350.6265.1144>
61. Richmond, D.J., Sinding, M.H.S. and Gilbert, M.T.P. (2016). The potential and pitfalls of de-extinction. *Zoologica Scripta*, 45, 22-36. <https://doi.org/10.1111/zsc.12212>

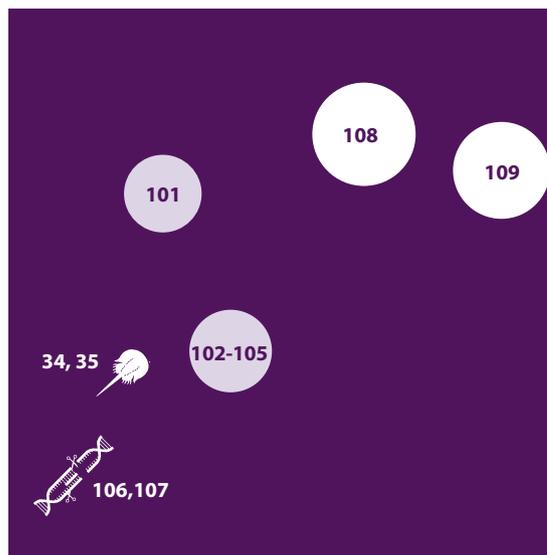
62. Sherkow, J.S. and Greely, H.T. (2013). What if extinction is not forever? *Science* 340(6128), 32-33. <https://doi.org/10.1126/science.1236965>
63. Moe-Behrens, G.H.G., Davis, R. and Haynes, K.A. (2013). Preparing synthetic biology for the world. *Front Microbiol* 4, 5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00005>
64. Hayes, K.R., Hosack, G.R., Dana, G.V., Foster, S.D., Ford, J.H., Thresher, R. et al. (2018). Identifying and detecting potentially adverse ecological outcomes associated with the release of gene-drive modified organisms. *Journal of Responsible Innovation* 5(S1), S139–S158. <https://doi.org/10.1080/23299460.2017.1415585>
65. David, A.S., Kaser, J.M., Morey, A.C., Roth, A.M. and Andow, D.A. (2013). Release of genetically engineered insects: a framework to identify potential ecological effects. *Ecology and Evolution* 3(11), 4000-4015. <https://doi.org/10.1002/ece3.737>
66. Kyrou, K., Hammond, A.M., Galizi, R., Kranjc, N., Burt, A., Beaghton, A.K. et al. (2018). A CRISPR–Cas9 gene drive targeting doublesex causes complete population suppression in caged *Anopheles gambiae* mosquitoes. *Nature Biotechnology*, 36, 1062-1066. <http://dx.doi.org/10.1038/nbt.4245>
67. Alliance for Science (2018). African scientists confident GMO mosquitoes will be game changer in fight to control malaria, September 13. <https://alliancefor-science.cornell.edu/blog/2018/09/african-scientists-confident-gmo-mosquitoes-will-game-changer-fight-control-malaria/>
68. Akbari, O.S., Bellen, H.J., Bier, E., Bullock, S.L., Burt, A., Church, G.M. et al. (2015). Safeguarding gene drive experiments in the laboratory. *Science* 349(6251), 927. <https://doi.org/10.1126/science.aac7932>
69. James, S., Collins, F.H., Welkhoff, P.A., Emerson, C., Godfray, H.C.J., Gottlieb, M. et al. (2018). Pathway to deployment of gene drive mosquitoes as a potential biocontrol tool for elimination of malaria in sub-Saharan Africa: Recommendations of a Scientific Working Group. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 98(6_Suppl), 1-49. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.18-0083>
70. Kwok, R. (2010) Five hard truths for synthetic biology. *Nature* 463, 288-290. <https://doi.org/10.1038/463288a>
71. Kaebnick, G.E., Heitman, E., Collins, J.P., Delborne, J.A., Landis, W.G., Sawyer, K. et al. (2016) Precaution and governance of emerging technologies. *Science* 354, 710-711. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aah5125>
72. Kriebel, D., Tickner, J., Epstein, P., Lemons, J., Levins, R., Loechler, E.L. et al. (2001). The precautionary principle in environmental science. *Environmental Health Perspectives* 109, 871-876. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.01109871>
73. Organisation for Economic Co-operation and Development (1993) *Safety evaluation of foods derived by modern biotechnology: concepts and principles*. Paris: OECD.
74. Oye, K.A., Esvelt, K., Appleton, E., Catteruccia, F., Church, G., Kuiken, T. et al. (2014) Regulating gene drives. *Science* 345, 626-628. <https://doi.org/10.1126/science.1254287>
75. Douglas, C.M.W. and Stemerding, D. (2014) Challenges for the European governance of synthetic biology for human health. *Life Sciences, Society and Policy* 10, 6. <https://doi.org/10.1186/s40504-014-0006-7>
76. Trump, B.D. (2017). Synthetic biology regulation and governance: Lessons from TAPIC for the United States, European Union, and Singapore. *Health Policy* 121, 1139-1146. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2017.07.010>
77. Glover, B., Akinbo, O., Savadogo, M., Timpo, S., Lemgo, G., Sinebo, W. et al. (2018). Strengthening regulatory capacity for gene drives in Africa: leveraging NEPAD's experience in establishing regulatory systems for medicines and GM crops in Africa. *BMC Proc.* 12(8). <https://doi.org/10.1186/s12919-018-0108-y>
78. Convention on Biological Diversity (2017). *Report of the ad hoc technical expert group on synthetic biology*. Montreal, Canada, 5-8 December 2017. CBD/SYN-BIO/AHTEG/2017/1/3. <https://www.cbd.int/doc/c/aa10/9160/6c3fcded265d-bee686715016/synbio-ahteg-2017-01-03-en.pdf>
79. Convention on Biological Diversity (2018). The Cartagena Protocol on Biosafety. Convention on Biological Diversity, Montreal. <http://bch.cbd.int/protocol>
80. Schmidt, M., Torgesen, H., Ganguli-Mitra, A., Kelle, A., Deplazes, A. and Biller-Andorno, N. (2008). SYNBIOSAFE e-conference: online community discussion on the societal aspects of synthetic biology. *Systems and Synthetic Biology* 2, 7-17. <https://doi.org/10.1007/s11693-008-9019-y>
81. Schmidt, M., Kelle, A., Ganguli-Mitra, A. and de Vriend, H. (2009). *Synthetic Biology: the technoscience and its societal consequences*. Springer, Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2678-1>
82. Emerson, C., James, S., Littler, K. and Randazzo, F. (2017). Principles for gene drive research. *Science*, 358, 1135-1136. <https://doi.org/10.1126/science.aap9026>
83. ETC Group. (2016). Reckless driving: gene drives and the end of nature, 1 September. <http://www.etcgroup.org/content/reckless-driving-gene-drives-and-end-nature>
84. Callaway, E. (2017). US defence agencies grapple with gene drives. *Nature News*, 21 July. <https://doi.org/10.1038/nature.2017.22345>
85. Defense Advanced Research Projects Agency (2018). Safe Genes program, DARPA. <https://www.darpa.mil/program/safe-genes>
86. Kaebnick, G.E., Gusmano, M.K. and Murray, T.H. (2014). The ethics of synthetic biology: next steps and prior questions. *Hastings Center Report* 44, S4-S26. <https://doi.org/10.1002/hast.392>
87. Batavia, C. and Nelson, M.P. (2017). For goodness sake! What is intrinsic value and why should we care? *Biological Conservation* 209, 366-376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2017.03.003>
88. Kaebnick, G.E. (2017). The spectacular garden: where might de-extinction lead? *Hastings Center Report* 47, S60-S64. <https://doi.org/10.1002/hast.754>
89. Kofler, N., Collins, J.P., Kuzma, J., Marris, E., Esvelt, K., Nelson, M.P. et al. (2018). Editing nature: Local roots of global governance. *Science* 362(6414), 527-529. <https://doi.org/10.1126/science.aat4612>
90. Ledford, H. (2010). Garage biotech: Life hackers. *Nature* 467, 650-652. <https://doi.org/10.1038/467650a>
91. Regalado, A. (2017). One man's quest to hack his own genes. *MIT Technology Review*, January 10. <https://www.technologyreview.com/s/603217/one-mans-quest-to-hack-his-own-genes/>
92. Ochoa Cruz, E.A., de la Barrera Benavidez, O.J., Giménez, M., Chavez, M. and Van Sluys, M-A. (2016). The biohacking landscape in Latin America. *BioCoder* 10, 5-12. <https://www.oreilly.com/ideas/biohacking-latin-america>.
93. Kolodziejczyk, B. (2017). Do-it-yourself biology shows safety risks of an open innovation movement. Brookings Institution, October 9. <https://www.brookings.edu/blog/techtank/2017/10/09/do-it-yourself-biology-shows-safety-risks-of-an-open-innovation-movement>

94. United Nations (2018). Terrorists potentially target millions in makeshift biological weapons 'laboratories', UN forum hears. UN News, 17 August 2018. United Nations, New York. <https://news.un.org/en/story/2018/08/1017352>
95. National Human Genome Research Institute (NHGRI). (2002). International Team of Researchers Assembles Draft Sequence of Mouse Genome. <https://www.genome.gov/10002983/2002-release-draft-sequence-of-mouse-genome>

Referencias gráficas



96. Daccord, N., Celton, J., Linsmith, G., Becker, C., Choisine, N., Schijlen, E., van de Geest, H., et al. (2017). High-quality *de novo* assembly of the apple genome and methylome dynamics of early fruit development. *Nature Genetics*, 49(7), 1099-1106. <https://doi.org/10.1038/ng.3886>
97. Holt, R.A., Subramanian, G.M., Halpern, A., Sutton, G.G., Charlab, R., Nusskern, D.R., Wincker, P., et al. (2002). The genome sequence of the malaria mosquito *Anopheles gambiae*. *Science*, 298(5591), 129-149. <https://doi.org/10.1126/science.1076181>
98. Cooper, G. (2000). *The Cell: A Molecular Approach*. 2nd ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
99. Annaluru, N., Muller, H., Mitchell, L., Ramalingam, S., Stracquadanio, G., Richardson, S., Dymond, J., et al. (2014). Total Synthesis of a Functional Designer Eukaryotic Chromosome. *Science*, 344(6179), 55-58. <https://doi.org/10.1126/science.1249252>



100. SAVI (2019). Synthetic yeast 2.0. The Science Across Virtual Institutes program. <http://syntheticyeast.org>
101. He, W., Felderman, M., Evans, A., Geng, J., Homan, D., Bourguet, F., Fischer, N., et al. (2017). Cell-free production of a functional oligomeric form of a Chlamydia major outer-membrane protein (MOMP) for vaccine development. *Journal of Biological Chemistry*, 292(36), 15121-15132. <https://doi.org/10.1074/jbc.M117.784561>
102. Woodrow Wilson Center (2019). Synthetic biology project. <http://www.synbio-project.org/cpi/applications/>
103. Reverdia (2019). Biosuccinium® sustainable succinic acid. <https://reverdia.com/biosuccinium-menu/biosuccinium/>
104. GC Innovation America (2019). Biotechnology Research & Development. <https://www.gcinovationamerica.com/biocatalyst-rd/>
105. DuPont Tate & Lyle Bio Products Company (2019). Susterra® Propanediol. <http://duponttateandlyle.com/susterra>
106. Ihry, R.J., Worringer, K.A., Salick, M.R., Frias, E., Ho, D., Theriault, K., Kommineni, S., et al. (2018). p53 inhibits CRISPR-Cas9 engineering in human pluripotent stem cells. *Nature Medicine*, 24, 939-946. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0050-6>
107. Haapaniemi, E., Botla, S., Persson, J., Schmierer, B. and Taipale, J. (2018). CRISPR-Cas9 genome editing induces a p53-mediated DNA damage response. *Nature Medicine*, 24, 927-930. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0049-z>
108. BCC Research (2018). Synthetic Biology Global Markets to Reach \$13.9 Billion by 2022. [https://www.bccresearch.com/pressroom/bio/synthetic-biology-global-markets-to-reach-\\$139-billion-by-2022](https://www.bccresearch.com/pressroom/bio/synthetic-biology-global-markets-to-reach-$139-billion-by-2022)
109. Cumbers, J. and Bünger, M. (2019). Synthetic Biology Annual Investment Report (2018) - SynBioBeta. SynBioBeta.com. <https://synbiobeta.com/synthetic-biology-industry-strategy-reports/investment-report-2018>



Fotografía: ALEX_UGALEK / Shutterstock

Conectividad ecológica: un puente para preservar la biodiversidad

Reconexión de ecosistemas fragmentados

Hubo un tiempo en que la naturaleza era inmensa e infinita, pero en el mundo industrializado del siglo **XXI** eso ya no ocurre. En todo el planeta, los paisajes terrestres y marinos se están fragmentando. La vida silvestre goza de menor libertad de movimientos, y los ríos de caudal libre son cada vez más excepcionales. A lo largo del litoral tropical, la línea de manglares, praderas submarinas y arrecifes de coral, antes continua, está hoy más fracturada, lo que merma la productividad esencial y la resiliencia de los ecosistemas frente a las perturbaciones naturales y antropógenas¹. Una de las consecuencias de la segmentación de los paisajes naturales es que los mamíferos y otras especies se desplazan menos de la mitad de la distancia que solían recorrer². Esta capacidad limitada para migrar, dispersarse, aparearse, alimentarse y prosperar hace que los animales silvestres se vean acorralados en situaciones en que la amenaza de la extinción se hace cada vez más patente.

La fragmentación suele ser un síntoma de la transformación y destrucción del paisaje. La división del hábitat en fragmentos acarrea tres efectos concretos: la reducción de la superficie y la calidad generales del hábitat, el mayor aislamiento de las parcelas de hábitat y el aumento de las perturbaciones relacionadas con los límites artificiales de los fragmentos de hábitat, o «efectos de borde»³⁻⁶. Las parcelas de hábitat aisladas y de menor tamaño acogen a menos especies con poblaciones más pequeñas, y la interacción entre las distintas parcelas es escasa. El mayor número de bordes entre fragmentos expone a las poblaciones que habitan la parcela a perturbaciones externas en los lindes. A la larga, cuando una parcela acaba siendo demasiado pequeña y aislada, deja de ser posible sostener poblaciones viables y la riqueza de especies⁵. La fragmentación provoca en última instancia una espiral descendente de disfunciones ecológicas, desde el desmantelamiento de las redes alimentarias o la pérdida de procesos ecológicos fundamentales, como los flujos de minerales y nutrientes, hasta la extinción directa de especies^{3,5,7-9}.

Mantener o restaurar la conectividad entre hábitats fragmentados o parcelas se ha señalado como la clave para contrarrestar muchas de las consecuencias negativas de la fragmentación¹⁰. La conectividad puede definirse como la medida en que los paisajes terrestres y marinos permiten que las especies se muevan libremente y que los procesos ecológicos se desarrollen sin trabas. Las pruebas científicas recogidas en estudios biogeográficos de islas y estudios sobre metapoblaciones de especies demuestran de forma abrumadora que los hábitats conectados preservan con más eficacia las especies y las funciones ecológicas^{11,12}. Las comunidades ecológicas y parcelas de hábitat conectadas sostienen procesos ecológicos esenciales como la polinización, la productividad, la descomposición y los ciclos bioquímicos y de nutrientes. Asimismo, la conectividad ecológica puede contribuir a que las especies se adapten a futuras condiciones ambientales y amortigüen los cambios, al aumentar la resiliencia ecológica frente a amenazas perturbadoras como el cambio climático¹³.

Pese a sus ventajas evidentes, en este momento las naciones del mundo carecen de un enfoque sistemático para implementar la conservación de la conectividad. ¿Cuáles son las mejores medidas para evaluar los resultados de la conservación de la conectividad? ¿Cómo crean corredores, diseñan redes ecológicas o determinan la eficacia de las medidas para la conservación de la conectividad los Gobiernos y los ecologistas? Conservar intactos los paisajes terrestres y marinos es viable mediante el diseño de más zonas protegidas, o de mayor escala, pero para ello es necesario tomar decisiones políticas, sociales y económicas difíciles^{14,15}. La conectividad como meta de conservación exige que las partes interesadas establezcan objetivos comunes que garanticen un planteamiento pluridimensional y la posibilidad de poner en práctica una acción coordinada. Para obtener resultados eficaces se precisa la colaboración entre los sectores público y privado. Poner freno a la pérdida de biodiversidad y reducir los efectos sobre los ecosistemas es responsabilidad de todos los sectores, desde el ámbito comunitario al internacional. En muchos casos, en el marco más amplio de las iniciativas en aras de la conservación pueden incorporarse aspectos socioeconómicos.



Profusión y abundancia de especies e interacción entre ellas



Variabilidad genética y flujo genético



Movimiento y dispersión



Riesgo de aparición de zoonosis, brotes y exposición del ser humano a enfermedades



Fragmentación del hábitat

Alrededor del 40% de los ecosistemas terrestres se han convertido en paisajes agrícolas¹⁶. La transformación de las tierras y los ríos para usos humanos propicia la fragmentación del hábitat. En los fragmentos de hábitat más pequeños y aislados rodeados de actividad humana resulta menos probable que se mantenga su función y que sobrevivan los animales y plantas que los habitan. La fragmentación del hábitat afecta negativamente a la abundancia, la distribución, el movimiento, la profusión de especies y la interacción entre ellas, la reproducción y la diversidad genética⁵. Asimismo, reduce la capacidad de las especies para adaptarse a nuevas condiciones climáticas¹⁷.



Las fuerzas de fragmentación

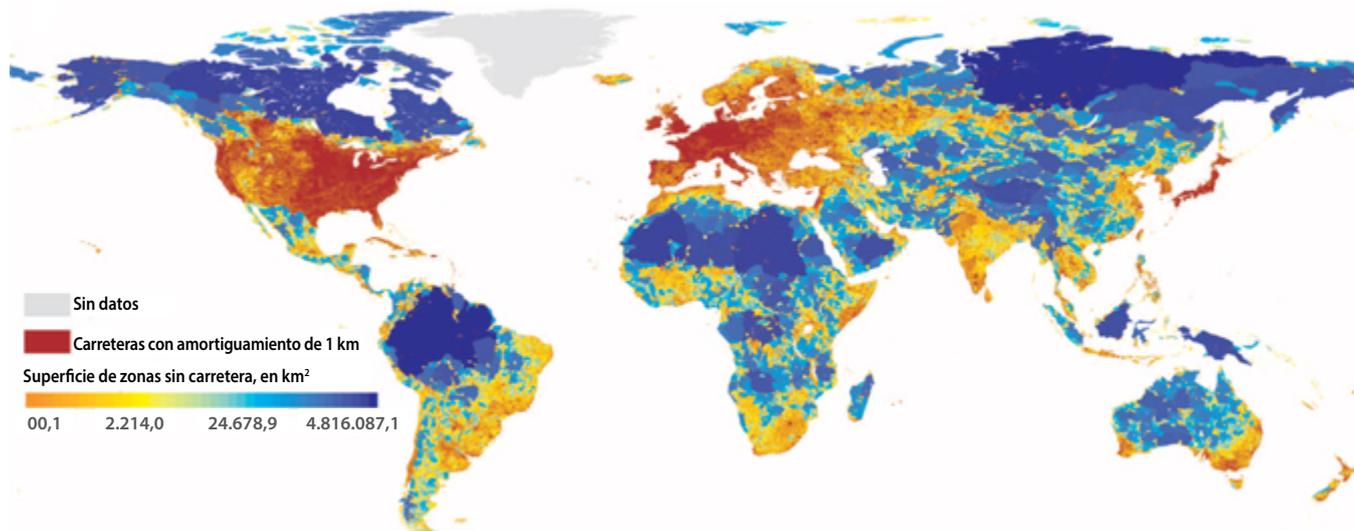
Las sociedades están transformando la biosfera de la Tierra y reestructurando su ecología de formas nunca vistas. Los últimos estudios indican que más del 75% de la superficie terrestre del planeta ha sido modificada por la humanidad¹⁸⁻²¹. Las presiones de la población humana, la urbanización en auge, la expansión agrícola, la contaminación y el desarrollo de infraestructura actúan de forma sinérgica como fuerzas de fragmentación. Según algunas proyecciones sobre el uso de la tierra, es posible que para 2050 se hayan desbrozado unos mil millones de hectáreas de terreno tropical específicamente con fines agrícolas²². El entorno marino es todavía menos inmune a esa tendencia: nuevos estudios señalan que, de los océanos del mundo, tan solo el 13%, aproximadamente, se clasifica todavía como zona marina en estado natural, mucho menos de lo que esperaban numerosos ecologistas²³.

La infraestructura lineal es a menudo la punta de lanza del desarrollo moderno. Carreteras, vías férreas, tuberías, cercas y canales se construyen a un ritmo sin precedentes, sobre todo en las regiones remotas, antes sin desarrollar, de los trópicos. Se prevé que el 90% de las nuevas construcciones de carreteras tengan lugar en naciones en desarrollo²⁴. En la India, donde vive casi el 60% de la

población de tigres del mundo, corredores fundamentales para ese animal se ven amenazados por los planes para construir 4.300 km de carreteras nacionales y estatales²⁵. A escala mundial, se prevé la construcción de más de 25 millones de kilómetros de carretera de aquí a 2050 —lo que supone aumentar en un 60% la longitud de las carreteras existentes en 2010—²⁶.

Los ríos de caudal libre, sustento ecológico de los paisajes y estuarios, están amenazados por la fragmentación resultante del tamaño y la escala de la construcción en curso de presas. Grandes presas dividen el 59% de los ríos del mundo, con lo que se altera la corriente natural del 93% del caudal mundial; además, se considera que casi el 28% está sometido a una regulación gravosa o severa²⁷. Solo en la cuenca del Amazonas se están desarrollando, construyendo o planificando en este momento más de 400 proyectos de presas²⁸. En conjunto, la construcción de presas y carreteras y la deforestación merman la integridad ecológica de las cuencas fluviales continentales, lo cual tiene consecuencias reales en otras actividades económicas y lúdicas del ser humano. Por ejemplo, la conectividad del agua dulce aporta alrededor de 200 millones de dólares de los Estados Unidos anuales a la economía pesquera de la cuenca del Amazonas, que da trabajo a unos 200.000 pescadores²⁹.

Fragmentación del paisaje a causa de las carreteras



Al analizar un conjunto de datos sobre 36 millones de kilómetros de carretera en todo el mundo se observa que las carreteras han dividido el paisaje terrestre en más de 600.000 parcelas. Más de la mitad de esas parcelas se encuentran a menos de un kilómetro de una carretera (en color rojo). En tonos azules se muestran las parcelas alejadas de las carreteras y menos afectadas por estas.

Fuente: Ibisch et al. (2016)³⁰

El río Xingú, en el norte de Brasil, en 2000 y 2017



El proyecto de construcción de la presa hidroeléctrica de Belo Monte en 2011 ha reconfigurado por completo el río Xingú. Más del 80% del caudal del río ha sido desviado, de modo que amplias zonas se han secado (en color naranja o marrón), lo que ha afectado de forma directa a las comunidades indígenas y la vida silvestre de la zona.

Fotografía: Joshua Stevens / NASA Earth Observatory

Los ríos, los paisajes terrestres y los litorales están ligados de forma inextricable. La conectividad también hace patente que la naturaleza funciona como una suma integrada de sus partes. La conectividad entre los sistemas acuáticos y terrestres resulta fundamental para la integridad ecológica, pero demasiado a menudo esos elementos se gestionan de manera independiente. En los ecosistemas templados, por ejemplo, las investigaciones han demostrado que la huella de las llanuras aluviales de los ríos con lecho de grava se extiende mucho más allá de las zonas ribereñas. Esto repercute en los proyectos de ecología terrestre subsuperficial que se desarrollan fuera de los canales fluviales visibles y sus deltas, acercándose más al ámbito marino. Los sistemas fluviales de caudal libre conectan a las comunidades acuáticas, aviarias y terrestres —desde los microbios hasta el oso gris— y al mismo tiempo ejercen influencia en la biogeoquímica de los paisajes terrestres y marinos³⁰.



Vídeo: Diseminación de semillas y fragmentación de los bosques



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=0m6AJWZ2p8I>

Fotografía: Jess Kraft / Shutterstock

© HHMI BioInteractive

Fragmentación y conectividad del paisaje

La **fragmentación del paisaje** consiste en la subdivisión de grandes hábitats continuos en fragmentos o parcelas más pequeños y aislados.

La **conectividad del paisaje** es la medida en que un paisaje concreto posibilita el desplazamiento de los animales y otras corrientes ecológicas.

A medida que el clima se calienta, mantener la conectividad entre zonas de temperaturas diferentes permitiría que los organismos se desplazaran por los gradientes de temperatura, lo que posibilitaría la adaptación de las especies

Los **espacios bien conectados** permiten que las especies migren a nuevos hábitats, en especial cuando necesitan **adaptarse al cambio climático**



La **fragmentación de los ríos** se debe fundamentalmente a las **presas y los embalses**, que desconectan los ecosistemas de subida y de bajada, lo que dificulta la dispersión y la migración de especies, así como el transporte de materia orgánica e inorgánica

En todo el mundo está prevista la construcción de más de **3.700 presas hidroeléctricas**

Las **carreteras modifican la conducta** de determinadas especies. Varios estudios han descubierto que animales como el erizo, la serpiente de cascabel, la tortuga, la ardilla roja y el caracol evitan cruzar las carreteras.

La **infraestructura de transporte**, por ejemplo las **carreteras** y las **vías férreas**, alteran el desplazamiento de la vida silvestre

Factores como la **anchura de las carreteras**, la intensidad del tráfico y la **curvatura** influyen en el número de especies que mueren por su causa

Se ha descubierto que la fragmentación del hábitat provoca una **reducción del número de depredadores apicales**

Un estudio mundial concluyó que **177 especies de mamíferos** habían perdido más del **30%** de su alcance geográfico, y más del **40%** de esas especies habían sufrido un acusado descenso de población

La **conectividad entre tierra y mar** abarca la migración biológica, el ciclo hidrológico, el transporte de nutrientes y otros procesos climáticos esenciales para los ecosistemas costeros y mundiales

La conectividad favorece las interacciones **entre la flora y la fauna**, como la polinización y la diseminación de semillas. En las zonas más conectadas, las plantas producen más fruto.



En 2030, casi el **40%** de los ríos del mundo estarán **gravemente fragmentados**

Las **prácticas de la silvicultura moderna** degradan la conectividad de los paisajes

Un importante estudio del Amazonas concluyó que la mejor manera de protegerlo de la actividad humana y garantizar su resiliencia frente al cambio climático sería crear **reservas naturales muy extensas y conectadas**

El **59%** de las **cuenas fluviales del mundo albergan grandes presas**, cifra que se elevará hasta el **75%** de aquí a 2030

Los **corredores ecológicos** son franjas de vegetación que conectan parcelas de hábitat y facilitan así el desplazamiento de la flora y la fauna

Las **parcelas intermedias** son parcelas relativamente pequeñas de vegetación autóctona diseminadas en el paisaje para promover el desplazamiento de las especies y su dispersión a larga distancia

Gracias a las parcelas intermedias, las especies pueden moverse entre hábitats aislados y colonizar nuevos hábitats

Crear **corredores entre las reservas naturales** facilita la conectividad de los hábitats, lo que a su vez favorece la profusión de especies en las reservas

En el Brasil, un estudio de especies aviarias sumamente sensibles observó que los **bosques más conectados** albergan a más especies de aves que los menos conectados

Los **hábitats marinos bien conectados** son más resilientes frente al cambio climático

La conectividad es esencial para los organismos de las **aguas costeras poco profundas tropicales y subtropicales**, que dependen de la migración entre los arrecifes de coral, los manglares, los estuarios y los ecosistemas de las cuencas bajas

En la Bahía de Moreton, en Australia, un estudio de los **arrecifes de coral** concluyó que las parcelas **mejor conectadas con los manglares** albergaban a una mayor diversidad de especies que aquellas que estaban aisladas de los manglares

Promoción de soluciones de conectividad

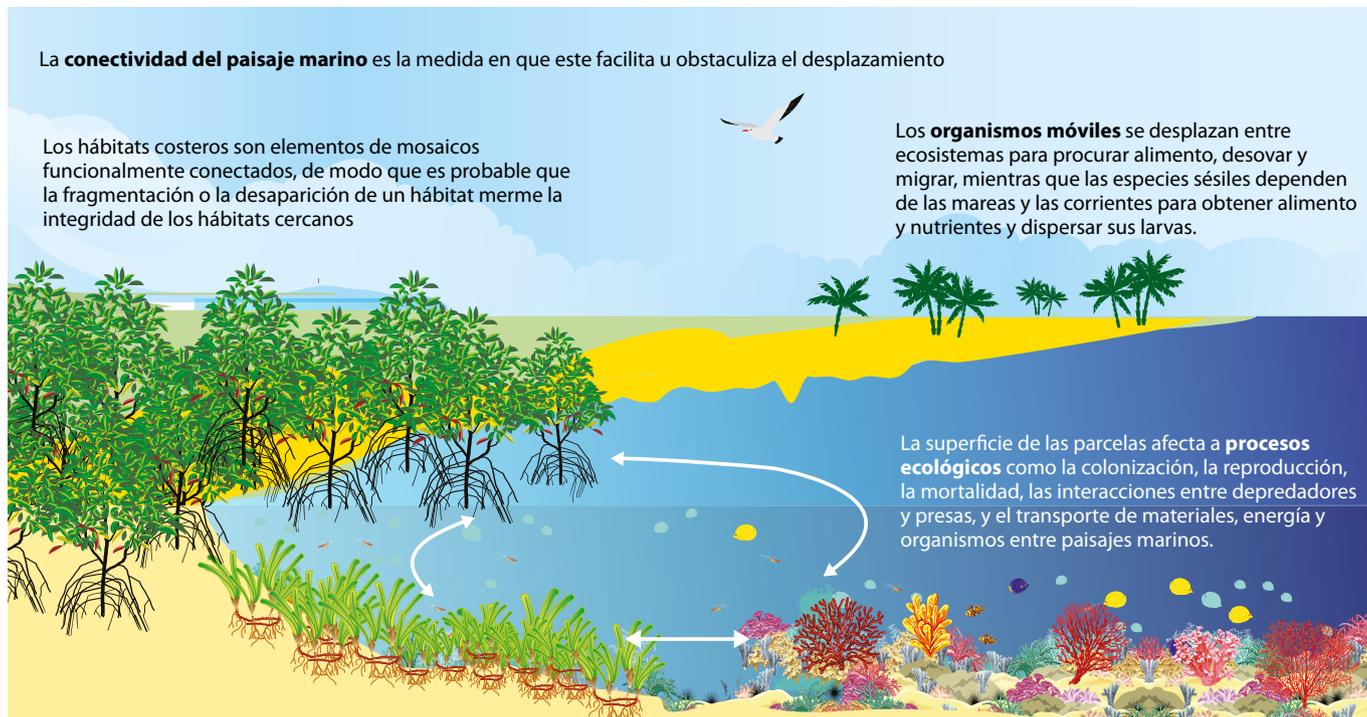
La conservación de la conectividad es el antídoto contra la fragmentación. En un momento en que las amenazas a la naturaleza han adquirido una envergadura que pone a prueba la capacidad de respuesta tanto humana como financiera, algunos países están empezando a implementar iniciativas. En el Brasil, la conservación de la conectividad rige las ambiciosas medidas adoptadas por el país para restaurar vínculos viables entre los fragmentados hábitats de la pluviselva atlántica conocida como «Mata Atlántica». Algunas especies en peligro han atraído el interés de proyectos de restauración dirigidos a conectar poblaciones aisladas, por ejemplo la del tamarino león dorado. Se ha demostrado que las iniciativas específicas de restauración reducen los índices de extinción de especies en bloques de bosque antes fragmentados³². La conectividad es ya un objetivo expreso de varias políticas del Brasil en aras de la biodiversidad. La ley Forestal y la ley de Protección de la Vegetación Nativa del Brasil destacan expresamente la conectividad como estrategia fundamental para la restauración del paisaje y la conservación de los hábitats^{33,34}.

Por su parte, el Gobierno de El Salvador propuso recientemente que el período comprendido entre 2021 y 2030 sea declarado «Decenio de las Naciones Unidas para la Restauración de los Ecosistemas», con el propósito de restaurar e impulsar la conectividad de los paisajes y las funciones ecológicas.

En África, el Gobierno de Tanzania aprobó hace poco una nueva ley de Conservación de la Vida Silvestre que hace hincapié en la necesidad de impulsar la conservación de los corredores ecológicos entre las zonas protegidas. En Kenya, donde la mayoría de la vida silvestre se encuentra fuera de las zonas protegidas y cuya planificación en los condados acaba de comenzar, el Servicio de Fauna y Flora de Kenya ha catalogado sistemáticamente los principales corredores y zonas de dispersión de la vida silvestre y ha elaborado una política nacional sobre los corredores ecológicos³⁵.

En el medio marino mundial, la conectividad funciona en tres dimensiones, pues la columna de agua suma otra variable a la ecología del desplazamiento. En ese sentido, el propio mar es un medio de conexión. Así pues, la conectividad marina se manifiesta de formas diversas en las conexiones entre el mar y la costa, las

Conectividad del paisaje marino



interacciones entre la superficie y el fondo marino, y en el marco de la dinámica de las mareas oceánicas³⁶. Resulta casi imposible que las áreas marinas protegidas, piedra angular de la conservación del océano, funcionen como elementos ecológicos aislados en este entorno altamente conectado. Por tanto, el mar favorece la creación de redes ecológicas que conectan hábitats esenciales en el espacio y en el tiempo. Además, la compleja historia de vida de numerosas especies marinas ha evolucionado paralelamente a las dinámicas de desplazamiento de este mundo líquido. Es sabido que las praderas submarinas y los manglares constituyen hábitats de cría para numerosas especies marinas que a menudo deben desplazarse posteriormente hasta los arrecifes de coral, los montes submarinos u otras aguas para madurar. La conectividad del paisaje marino se subraya como principio rector fundamental en la conservación del medio marino y la planificación espacial, así como en las iniciativas de restauración; no obstante, en la práctica pocas veces se incorpora al diseño de las redes de reservas marinas³⁶⁻³⁹. Ello se debe fundamentalmente a la escasez de datos cuantitativos sobre los diversos aspectos de la conectividad de los que se dispone en la fase de diseño, por ejemplo acerca de los patrones de dispersión y desplazamiento de las especies principales en diferentes etapas de su vida, sobre la conectividad ecológica en las reservas y fuera de ellas —y entre los distintos tipos de hábitats— y en relación con la conectividad genética entre poblaciones^{10,38-40}. Sin embargo, cabe mencionar que los estudios sobre las interacciones entre la conectividad y el desempeño de las reservas marinas en el Caribe, los Cayos de Florida, las islas Salomón, la Bahía de Moreton y la Gran Barrera de Arrecifes de Australia demuestran la importancia ecológica de una mayor conectividad. En esas áreas protegidas se observaron efectos positivos en la abundancia de peces, la profusión y composición de especies, el reclutamiento y diversos procesos ecológicos^{10,41-44}.

La comunidad internacional ha hecho esfuerzos para promover soluciones de conectividad. En 2016, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) puso en marcha el Grupo de Especialistas en la Conservación de la Conectividad con ánimo de movilizar y vigorizar la práctica en auge de la conservación de la conectividad. Con alrededor de 900 miembros de 80 países, el Grupo se dedica a desarrollar la capacidad para la práctica de una conservación sistemática de la conectividad en todo el mundo mediante la creación de redes y la provisión de orientación gracias a la combinación de conocimientos científicos, de ingeniería y sobre políticas.

▶ Vídeo: ¿Qué es la conectividad marina?



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=MowPR5GYqKM>
Fotografía: Damsea / Shutterstock

© Ifremer

▶ Vídeo: Entre bastidores: la migración del cangrejo rojo (Isla de Navidad, 2012)



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=n9yJ51LQ0sI>
Fotografía: David Stanley

© Parks Australia

Fijar metas para la conectividad del futuro

Las Metas de Aichi para la Diversidad Biológica, adoptadas por el Convenio sobre la Diversidad Biológica en el marco de la implementación del Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011-2020, abarcan la conectividad del paisaje terrestre y marino. La Meta de Aichi para la Diversidad Biológica número 11 establece que al menos el 17% de las zonas terrestres y las aguas continentales, y el 10% de las zonas costeras y marinas deben protegerse en todo el mundo por medio de un sistema bien conectado de áreas protegidas. Sin embargo, muchos científicos consideran que la conservación de la biodiversidad actual merece un objetivo más ambicioso^{45,46}. La comunidad científica dedicada a la conservación señala que, como término medio, debe gestionarse el 50% de todas las tierras y mares para sostener los procesos ecológicos que mantienen la naturaleza y los umbrales críticos de salud del planeta, incluidos los servicios de los ecosistemas en los que se sustentan los medios de vida humanos^{4,14,15}. En numerosas zonas de importancia ecológica mundial, los científicos justifican, y los políticos respaldan, una meta más ambiciosa. Por ejemplo, en la cuenca del Amazonas se requiere mayor protección para sostener las funciones ideológicas y climáticas regionales y mundiales de esta enorme cuenca de drenaje. Si el Amazonas perdiera más del 20% de sus bosques, los modelos predicen una inversión de los umbrales que daría pie a condiciones más propicias para la sabana tropical que para los bosques, lo que repercutiría en los patrones climáticos mundiales⁴⁷. Al implementar las Metas de Aichi para la Diversidad Biológica, el Gobierno del Brasil se mostró más ambicioso con vistas a proteger el 30% del Amazonas y, al mismo tiempo, velar por que otros biomas de su territorio cumplan por separado el 17% de la meta de Aichi⁴⁸. El próximo plan estratégico decenal del CDB, correspondiente al período 2021-2030, se negociará en China en octubre de 2020. La comunidad en favor de la conservación se muestra entusiasmada ante la posibilidad de que los objetivos establecidos en la Meta 11 puedan dotarse de mayor ambición y armonizarse con el objetivo «El 50% para la naturaleza» en el año 2050.

Si bien se han dedicado muchos esfuerzos a cumplir los porcentajes de protección de tierras, agua dulce y mares, también se reconoce que se podría hacer más sobre el factor modificador que representa un sistema bien conectado de zonas protegidas, así como sobre otras medidas eficaces de conservación aplicables en zonas determinadas. Los datos científicos demuestran de forma inequívoca que las zonas protegidas conectadas dan mejores resultados^{49,50}. Conectar paisajes terrestres y marinos fragmentados mediante redes ecológicas puede resultar eficaz para mejorar la funcionalidad de la naturaleza e impulsar enfoques más ambiciosos de conservación.



Los **corredores ecológicos** son una estrategia de conectividad para proteger la migración de las especies que goza de gran aceptación. A menudo los corredores se diseñan para una especie en concreto, como el antílope americano en América del Norte, el tigre en Asia y el jaguar en América del Sur. Los corredores adoptan un sinfín de formas y tamaños en función de la especie de interés y de las limitaciones del paisaje, desde discretos senderos lineales hasta series de parcelas de hábitat intermedias que facilitan la migración de aves o tortugas marinas.

Las **zonas de conexión** son áreas de paisajes terrestres o marinos más amplias que mantienen la conectividad en beneficio de un amplio conjunto de especies y procesos ecológicos. Esas zonas comprenden grandes franjas de tierra o mar que facilitan la dispersión en las zonas protegidas, un aspecto fundamental en lugares como África Oriental, donde la inmensa mayoría de la vida silvestre se encuentra fuera de las zonas protegidas. Las zonas de conexión también facilitan el desplazamiento de los animales, la biomasa y la energía entre las parcelas de hábitat o entre distintos ecosistemas de las zonas protegidas.

Las **zonas de permeabilidad** son el concepto de mayor escala utilizado por los ecólogos para proteger los valores de la conectividad en las regiones dominadas por el ser humano fuera de las zonas protegidas. Satisfacen las necesidades estacionales o el alcance espacial del desplazamiento de las especies y procesos ecológicos como las charcas temporales o determinadas corrientes hidrológicas de agua dulce.

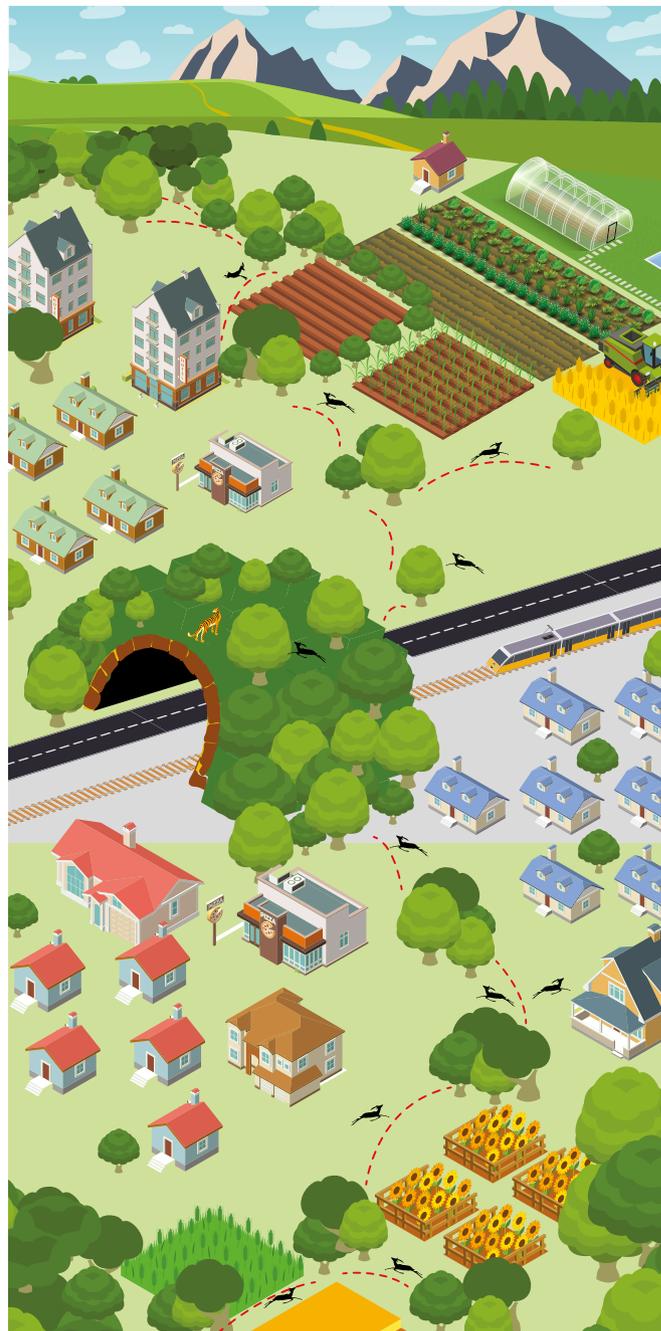
Los científicos han propuesto la creación de **corredores climáticos** con ánimo de preservar los desplazamientos de las especies en función de los gradientes de temperatura; además, esos corredores a menudo se convierten en «refugios climáticos»⁵¹. Algunas iniciativas para la conservación de la conectividad incluyen expresamente entre sus objetivos la resiliencia al clima, por ejemplo la iniciativa Great Eastern Ranges, en Australia⁵².

En este momento, el 14,7% del suelo está cubierto por zonas protegidas, y menos de la mitad de estas están conectadas⁵⁰. De este dato cabe deducir que todavía hay mucho margen para mejorar la conectividad entre las áreas protegidas del planeta. Si el mundo desea adoptar medidas rápidas a gran escala en favor de la conservación, conectar las zonas protegidas por medio de redes ecológicas ofrece perspectivas esperanzadoras.

La aplicación de la conservación de la conectividad es todavía relativamente incipiente en el marco más amplio de la práctica de la conservación, y queda mucho que aprender para perfeccionar las mejores prácticas^{53,54}. Al tratarse de una práctica nueva, la conservación de la conectividad ecológica se topa con sus mayores retos de implementación fuera de las zonas protegidas. Una de las necesidades primordiales es, sin duda, limitar los efectos de las fuerzas de fragmentación, tales como el desarrollo de infraestructura lineal. Igualmente importante resulta concienciar a los encargados de formular políticas, los organismos gubernamentales y las partes interesadas de las comunidades locales sobre la importancia de la conectividad ecológica. Aunque algunos países podrían aprobar medidas regulatorias para conservar la conectividad, la inmensa mayoría de las iniciativas en favor de la conectividad ecológica dependerán de enfoques de conservación participativos basados en incentivos⁵⁵. Adaptar las políticas ambientales vigentes podría facilitar la adopción de la conservación de la conectividad mediante la inclusión de metas de conectividad en las evaluaciones de impacto ambiental y en diversos programas de financiación e incentivos fiscales de la conservación.

Las zonas protegidas no pueden salvar por sí solas la biodiversidad ni conservar las funciones ecológicas interconectadas que sostienen la vida en el planeta. La conectividad es la encarnación de la ecología, que es la ciencia de la interdependencia. Se trata de un aspecto imprescindible, pues las tierras, el agua dulce y los mares interconectados son el sustento de la naturaleza intacta. Por consiguiente, las redes conectadas ofrecen la mejor oportunidad para mantener y restaurar los procesos ecológicos y evolutivos, evitar extinciones y proteger los ecosistemas terrestres, de agua dulce y marinos que son esenciales para la humanidad y para la vida en general. La conectividad podría garantizar la resiliencia de los ecosistemas del mundo, facilitar su adaptación al cambio global y preservar su capacidad para sostener la integridad ecológica que satisfaga las necesidades de las generaciones presentes y futuras. Hasta que se superen las fuerzas de fragmentación, con el diseño de la conservación de la conectividad se crea una red de seguridad para la conservación de la biodiversidad y, en última instancia, de la humanidad.

Parcelas intermedias y lugares de cruce

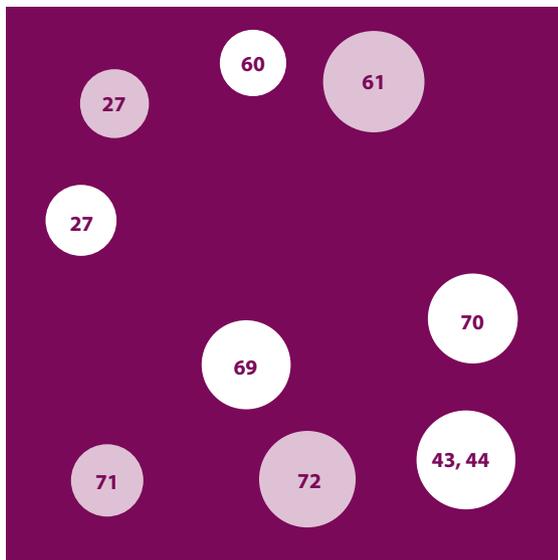
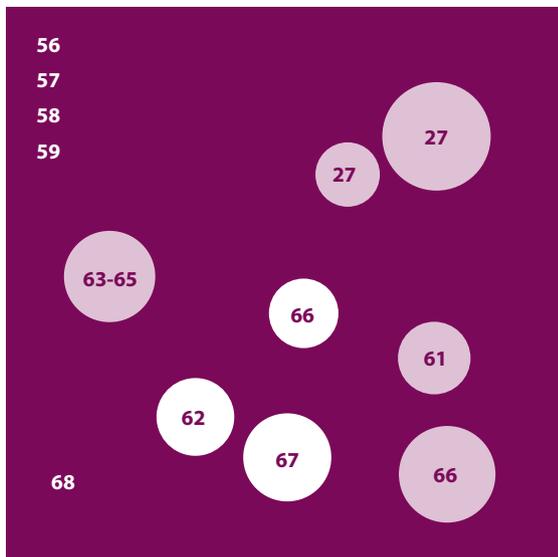


Bibliografía

1. Cullen-Unsworth, L.C. and Unsworth, R. (2018). A call for seagrass protection. *Science* 361(6401), 446-448. <https://doi.org/10.1126/science.aat7318>
2. Tucker, M.A., Böhning-Gaese, K., Fagan W.F., Fryxell J.M., Van Moorter, B., Alberts, S.C. *et al.* (2018) Moving in the Anthropocene: Global reductions in terrestrial mammalian movements. *Science* 359(6374), 466-469. <https://doi.org/10.1126/science.aam9712>
3. Haddad, N.M., Brudvig, L.A., Clobert, J., Davies, K.F., Gonzalez, A., Holt, R.D. *et al.* (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances* 1(2), e1500052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>
4. Wilson, E.O. (2016). *Half-Earth: our planet's fight for life*. London: W.W. Norton & Company
5. Fahrig, L. (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*. 34, 487-515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>
6. Laurance, W.F., Nascimento, H.E.M., Laurance, S.G., Ana Andrade, A., Ewers, R.M., Harms, K.E. *et al.* (2007) Habitat fragmentation, variable edge effects, and the landscape-divergence hypothesis *PLoS ONE* 2(10), e1017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001017>
7. Crook, D.A., Winsor, H., Lowe, W.H., Allendorf, F.W., Eros, T., Finn, D.S., Gillanders, B.M. *et al.* (2015) Human effects on ecological connectivity in aquatic ecosystems: Integrating scientific approaches to support management and mitigation. *Science of The Total Environment* 534, 52-64. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.034>
8. Crooks, K.R., Burdett, C.L., Theobald, D.M., King, S.R.B., Di Marco, M., Rondinini, C. *et al.* (2017) Quantification of habitat fragmentation reveals extinction risk in terrestrial mammals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(29), 7635-7640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705769114>
9. Laurance, W.F., Camargo, J.L.C., Luizão, R.C.C., Laurance, S.G., Pimm, S.L., Bruna, E.M. *et al.* (2011) The fate of Amazonian forest fragments: A 32-year investigation. *Biological Conservation* 144(1), 56-67. <http://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.09.021>
10. Olds, A.D., Connolly, R.M., Pitt, K.A., Pittman, S.J., Maxwell, P.S., Huijbers, C.M. *et al.* (2015). Quantifying the conservation value of seascape connectivity: a global synthesis. *Global Ecology and Biogeography* 25, 3-15. <https://doi.org/10.1111/geb.12388>
11. MacArthur, R.H. and Wilson, E.O. (1967). *The theory of island biogeography*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
12. Gilbert-Norton, L., Wilson, R., Stevens, J.R. and Beard, K.H. (2010). A meta-analytic review of corridor effectiveness. *Conservation Biology* 24(3), 660-668. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01450.x>
13. Heller, N.E. and Zavaleta, E.S. (2009). Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation* 142(1), 14-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2008.10.006>
14. Noss, R.F., Dobson, A.P., Baldwin, R., Beier, P. Davis, C.R., Dellasala, D.A. *et al.* (2012) Bolder thinking for conservation. *Conservation Biology* 26(1), 1-4. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01738.x>
15. Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N.D., Wikramanayake, E. *et al.* (2017). An ecoregion-based approach to protecting half the terrestrial realm. *BioScience* 67(6), 534-545. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix014>
16. Barnosky, A.D., Hadly, E.A., Bascompte, J., Berlow, E.L., Brown, J.H., Fortelius, M. *et al.* (2012). Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature* 486(7401), 52. <https://doi.org/10.1038/nature11018>
17. McGuire, J.L., Lawler, J.J., McRae, B.H., Nunez, T.A. and Theobald, D.M. (2016). Achieving climate connectivity in a fragmented landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(26), 7195-7200. <https://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1602817113>
18. Ellis, E.C., Goldewijk, K.K., Siebert, S., Lightman, D. and Ramankutty, N. (2010). Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography* 19(5), 589-606. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00540.x>
19. Oakleaf, J.R. and Kennedy, C.M. (2016). Comparison of global human modification and human footprint maps. *The Nature Conservancy*. http://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/lands/science/publications/Documents/HM_HF_comparison_documentation.pdf
20. Venter, O., Sanderson, E.W., Magrach, A., Allan, J.R., Beher, J., Jones, K.R. *et al.* (2016). Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. *Nature Communications* 7, 12558. <https://doi.org/10.1038/ncomms12558>
21. Watson, J.E.M., Shanahan, D.F., Di Marco, M., Allan, J., Laurance, W.F., Sanderson, E.W. *et al.* (2016). Catastrophic declines in wilderness areas undermine global environment targets. *Current Biology* 26, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.08.049>
22. Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., and Befort, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108(50), 20260-20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
23. Jones, K.R., Klein, C.J., Halpern, B.S., Venter, O., Grantham, H., Kuempel, C.D. *et al.* (2018). The location and protection status of Earth's diminishing marine wilderness. *Current Biology* 28(15), 2506-2512. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.06.010>
24. Laurance, W.F., Clements, G.R., Sloan, S., O'Connell, C.S., Mueller, N.D., Goosem, M. *et al.* (2014). A global strategy for road building. *Nature* 513(7517), 229. <https://doi.org/10.1038/nature13717>
25. Habib, B., Rajvanshi, A., Mathur, V.B., and Saxena, A. (2016). Corridors at crossroads: Linear development-induced ecological triage as a conservation opportunity. *Frontiers in Ecology and Evolution* 4, 132. <https://doi.org/10.3389/fevo.2016.00132>
26. Dulac, J. (2013). Global land transport infrastructure requirements - estimating infrastructure capacity and costs to 2050. Paris: International Energy Agency. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TransportInfrastructureInsights_FINAL_WEB.pdf
27. Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A.E., MacDonald, G.K., Zarfl, C. and Liermann, C.R. (2015) An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters* 10(1). <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/1/015001/meta>
28. Fundación Proteger, International Rivers and ECOA (2018). Dams in Amazonia website. <http://dams-info.org/>
29. Tundisi, J.G., Goldemberg, J., Matsumura-Tundisi, T. and Saraiva, A.C.F. (2014). How many more dams in the Amazon? *Energy Policy* 74, 703-708. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.013>

30. Ibsch, P.L., Hoffmann, M.T., Kreft, S., Pe'er, G., Kati, V., Biber-Freudenberger, L., DellaSala, D.A., et al. (2016). A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*, 354(6318), 1423-1427. <https://doi.org/10.1126/science.aaf7166>
31. Hauer, F.R., Locke, H., Dreitz, V.J., Hebblewhite, M., Lowe, W.H., Muhlfeld, C.C. et al. (2016). Gravel-bed river floodplains are the ecological nexus of glaciated mountain landscapes. *Science Advances* 2(6), e1600026. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600026>
32. Newmark, W.D., Jenkins, C.N., Pimm, S.L., McNeally, P.B. and Halley, J.M. (2017). Targeted habitat restoration can reduce extinction rates in fragmented forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(36), 9635-9640. <https://doi.org/10.1073/pnas.1705834114>
33. García, L.C., Santos, J.S., Matsumoto, M., Silva, T.S.F., Padovezi, A., Sparovek, G. et al. (2013). Restoration challenges and opportunities for increasing landscape connectivity under the new Brazilian Forest Act. *Natureza & Conservação* 11(1), 181-185. <http://dx.doi.org/10.4322/natcon.2013.028>
34. Brancalion, P.H.S., Garcia, L.C., Loyola, R., Rodrigues, R.R., Pillar, V.P., and Lewinsohn, T.M. (2012). A critical analysis of the Native Vegetation Protection Law of Brazil (2012): updates and ongoing initiatives. *Natureza & Conservação* 14(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.03.003>
35. Ojwang', G.O., Wargute, P.W., Said, M.Y., Worden, J.S., Davidson, Z., Muruthi, P. et al. (2017). Wildlife Migratory Corridors and Dispersal Areas: Kenya Rangelands and Coastal Terrestrial Ecosystems. Nairobi: Kenya Wildlife Service
36. Carr, M.H., Robinson, S.P., Wahle, C., Davis, G., Kroll, S., Murray, S. et al. (2017). The central importance of ecological spatial connectivity to effective marine protected areas and to meeting the challenges of climate change in the marine environment. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 27(S1), 6–29. <https://doi.org/10.1002/aqc.2800>
37. Magris, R.A., Pressey, R.L., Weeks, R. and Ban, N.C. (2014). Integrating connectivity and climate change into marine conservation planning. *Biological Conservation* 170, 207–221. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.12.032>
38. Green, A.L., Maypa, A.P., Almany, G.R., Rhodes, K.L., Weeks, R., Abesamis, R.A. et al. (2015). Larval dispersal and movement patterns of coral reef fishes, and implications for marine reserve network design. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* 90(4), 1215–1247. <https://doi.org/10.1111/brv.12155>
39. Engelhard, S.L., Huijbers, C.M., Stewart-Koster, B., Olds, A.D., Schlacher, T.A. and Connolly, R.M. (2016). Prioritising seascape connectivity in conservation using network analysis. *Journal of Applied Ecology* 54(4), 1130–1141. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12824>
40. Foster, N.L., Paris, C.B., Kool, J.T., Baums, I.B., Stevens, J.R., Sanchez, J.A., Bastidas, C. et al. (2012). Connectivity of Caribbean coral populations: complementary insights from empirical and modelled gene flow. *Molecular Ecology* 21(5), 1143–1157. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2012.05455.x>
41. Huntington, B.E., Karnauskas, M., Babcock, E.A. and Limran, D. (2010). Untangling natural seascape variation from marine reserve effects using a landscape approach. *PLoS ONE* 5, e12327. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012327>
42. Valentine, J.F., Heck, K.L., Jr, Blackmon, D., Goecker, M.E., Christian, J., Kroutil, R.M. et al. (2008). Exploited species impacts on trophic linkages along reef-seagrass interfaces in the Florida keys. *Ecological Applications* 18(6), 1501–1515. <https://doi.org/10.1890/07-1720.1>
43. Olds, A.D., Pitt, K.A., Maxwell, P.S. and Connolly, R.M. (2012). Synergistic effects of reserves and connectivity on ecological resilience. *Journal of Applied Ecology* 49(6), 1195–1203. <https://doi.org/10.1111/jpe.12002>
44. Olds, A.D., Albert, S., Maxwell, P.S., Pitt, K.A. and Connolly, R.M. (2013). Mangrove-reef connectivity promotes the functioning of marine reserves across the western Pacific. *Global Ecology and Biogeography* 22(9), 1040–1049. <https://doi.org/10.1111/geb.12072>
45. Butchart, S.H., Clarke, M., Smith, R.J., Sykes, R.E., Scharlemann, J.P., Harfoot, M. et al. (2015). Shortfalls and solutions for meeting national and global conservation area targets. *Conservation Letters* 8(5), 329-337. <https://doi.org/10.1111/cons.12158>
46. Dudley, N., Jonas, H., Nelson, F., Parrish, J., Pyhälä, A., Stolton, S. et al. (2018). The essential role of other effective area-based conservation measures in achieving big bold conservation targets. *Global Ecology and Conservation* 15, e00424. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00424>
47. Zemp, D.C., Schleussner, C.F., Barbosa, H.M., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G. et al. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature Communications* 8, 14681. <https://doi.org/10.1038/ncomms14681>
48. Pacheco, A.A., Neves, A.C.O. and Fernandes, G.W. (2018). Uneven conservation efforts compromise Brazil to meet the Target 11 of Convention on Biological Diversity. *Perspectives in Ecology and Conservation* 16(1), 43-48. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.12.001>
49. Beier, P. and Noss, R.F. (1998). Do habitat corridors provide connectivity? *Conservation Biology* 12(6), 1241-1252. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1998.98036.x>
50. Saura, S., Bastin, L., Battistella, L., Mandrici, A. and Dubois, G. (2017). Protected areas in the world's ecoregions: How well connected are they? *Ecological Indicators* 76, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.047>
51. Krosby, M., Tewksbury, J., Haddad, N.M. and Hoekstra, J. (2010). Ecological connectivity for a changing climate. *Conservation Biology* 24(6), 1686-1689. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01585.x>
52. Pulsford, I., Fitzsimons, J. and Wescott, G. (eds.) (2013). *Linking Australia's landscapes: Lessons and opportunities from large-scale conservation networks*. CSIRO Publishing. <https://doi.org/10.1111/1745-5871.12060>
53. Correa Ayram, C.A., Mendoza, M.E., Etter, A. and Salicrup, D.R.P. (2016). Habitat connectivity in biodiversity conservation: a review of recent studies and applications. *Progress in Physical Geography* 40(1), 7-37. <https://doi.org/10.1177%2F0309133315598713>
54. Worboys, G., Francis, W.L. and Lockwood, M. (eds.) (2010). *Connectivity conservation management: a global guide (with particular reference to mountain connectivity conservation)*. London: Earthscan
55. Watson, J.E.M., Venter, O., Lee, J., Jones, K.R., Robinson, J.G., Possingham, H.P. et al. (2018) Protect the last of the wild, 31 October. <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07183-6>

Referencias gráficas



56. Didham, R. (2010). The Ecological Consequences of Habitat Fragmentation. Wiley Online Library. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0021904>

57. Cleveenger, A. P. and Wierzychowski, J. (2006) Maintaining and restoring connectivity in landscapes fragmented by roads. In Crooks, K. R. and Sanjayan, M. (eds), *Connectivity Conservation*. Cambridge: Cambridge University Press, 502–535. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754821.023>

58. Nuñez, T., Lawler, J., Mcrae, B., Pierce, J., Krosby, M., Kavanagh, D., Singleton, P. et al (2013). Connectivity Planning to Address Climate Change. *Conservation Biology*, 27(2), 407-416. <https://doi.org/10.1111/cobi.12014>

59. Proctor, S., McClean, C. and Hill, J. (2011). Protected areas of Borneo fail to protect forest landscapes with high habitat connectivity. *Biodiversity and Conservation*, 20(12), 2693-2704. <https://doi.org/10.1007/s10531-011-0099-8>

60. Bergsten, A., Bodin, Ö. and Ecke, F. (2013). Protected areas in a landscape dominated by logging – A connectivity analysis that integrates varying protection levels with competition–colonization tradeoffs. *Biological Conservation*, 160, 279-288. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.01.016>

61. Laurance, W. and Useche, D. (2009). Environmental Synergisms and Extinctions of Tropical Species. *Conservation Biology*, 23(6), 1427-1437. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01336.x>

62. Morris, R. (2010). Anthropogenic impacts on tropical forest biodiversity: a network structure and ecosystem functioning perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1558), 3709-3718. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0273>

63. Trombulak, S. and Frissell, C. (2000). Review of Ecological Effects of Roads on Terrestrial and Aquatic Communities. *Conservation Biology*, 14(1), 18-30. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>

64. Chen, H.L. and Koprowski, J.L. (2016). Differential effects of roads and traffic on space use and movements of native forest-dependent and introduced edge-tolerant species. *PLoS ONE*, 11(1), e0148121. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148121>

65. Shepard, D.B., Kuhn, A.R., Dreslik, M.J. and Phillips, C.A. (2008). Roads as barriers to animal movement in fragmented landscapes. *Animal Conservation*, 11, 288-296. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2008.00183.x>

66. Gurrutxaga, M. and Saura, S. (2013). Prioritizing highway defragmentation locations for restoring landscape connectivity. *Environmental Conservation*, 41(02), 157-164. <https://doi.org/10.1017/S0376892913000325>

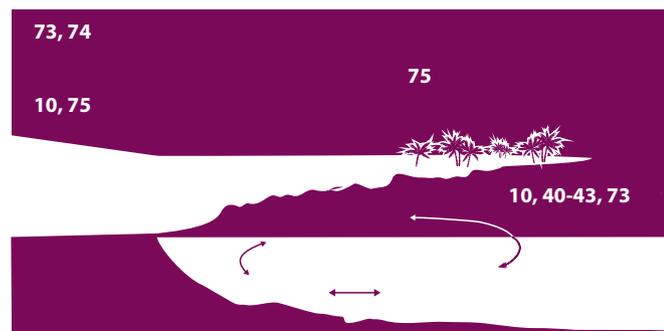
67. Ceballos, G., Ehrlich, P. and Dirzo, R. (2017). Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(30), E6089-E6096. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704949114>

68. Tewksbury, J., Levey, D., Haddad, N., Sargent, S., Orrock, J., Weldon, A., Danielson, B., et al (2002). Corridors affect plants, animals, and their interactions in fragmented landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(20), 12923-12926. <https://doi.org/10.1073/pnas.202242699>

69. Brudvig, L.A., Damschen, E.I., Tewksbury, J.J., Haddad, N.M. and Levey, D.J. (2009). Landscape connectivity promotes plant biodiversity spillover into non-target habitats. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(23), 9328-9332. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0809658106

70. Martensen, A.C., Ribeiro, M.C., Banks-Leite, C., Prado, P.I. and Metzger, J.P. (2012). Associations of forest cover, fragment area, and connectivity with neotropical understory bird species richness and abundance. *Conservation Biology*, 26(6), 1100-1111. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01940.x>

71. Fox, A.D., Henry, L-A., Corne, D.W. and Roberts, J.M. (2016). Sensitivity of marine protected area network connectivity to atmospheric variability. *Royal Society Open Science*, 3: 160494. <http://dx.doi.org/10.1098/rsos.160494>
72. Fang, X., Hou, X., Li, X., Hou, W., Nakaoka, M. and Yu, X. (2018). Ecological connectivity between land and sea: a review. *Ecological Research*, 33, 51–61. <https://doi.org/10.1007/s11284-017-1549-x>



73. Grober-Dunsmore, R., Pittman, S.J., Caldow, C., Kendall, M.S. and Frazer, T.K. (2009). A landscape ecology approach for the study of ecological connectivity across tropical marine seascapes. In: Nagelkerken, I. (ed), *Ecological connectivity among tropical coastal ecosystems*. Springer, Dordrecht, 493–530. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2406-0_14
74. Earp, H.S., Prinz, N., Cziesielski, M.J. and Andskog, M. (2018). For a world without boundaries: Connectivity between tropical ecosystems in times of change. In S. Jungblut, V. Liebich and M. Bode (eds.), *YOUMARES 8 – Oceans Across Boundaries: Learning from each other*. Proceedings of the 2017 conference for YOUnG MARine REsearchers in Kiel, Germany. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93284-2_9
75. Boström, C., Pittman, S.J., Simenstad, C. and Kneib, R.T. (2011). Seascape ecology of coastal biogenic habitats: advances, gaps, and challenges. *Marine Ecology Progress Series*, 427, 191-217. <https://doi.org/10.3354/meps09051>



*Turberas del permafrost con numerosas depresiones lacustres, Cabo Bolvansky (Rusia)
Fotografía: Hans Joosten*

Turberas del permafrost: pérdida de terreno en un mundo cada vez más cálido

Aceleración del cambio en el Ártico

Las turberas situadas en los trópicos atraen mucha atención y son una referencia mundial por su función esencial para el almacenamiento del carbono y la mitigación del cambio climático. Pese a que almacenan casi 120 gigatoneladas de carbono de turba, estas solo representan en torno al 20% de todo el carbono contenido en las turberas del mundo¹. Los volúmenes más elevados se almacenan en las zonas más septentrionales del planeta, entre ellas la región nórdica circumpolar, que retiene casi la mitad del carbono orgánico del suelo del mundo, en gran medida en forma de turba congelada permanentemente²⁻⁵.

Una gran parte del terreno del hemisferio norte se congela y descongela de manera estacional; otra permanece congelada durante todo el año. Debajo de unos 23 millones de kilómetros cuadrados de terreno en el norte se encuentra el permafrost, un terreno que se mantiene a temperaturas bajo cero durante al

menos dos años consecutivos. Existen turberas árticas y subárticas en las zonas de permafrost del Canadá, Dinamarca y Groenlandia, los Estados Unidos, Finlandia, Noruega, Rusia y Suecia. Turberas del permafrost con una capa de turba de más de 40 cm de grosor ocupan una superficie superior a 1,4 millones de km², y la turba de menor grosor se extiende por un área todavía mayor^{3,6-8}. También pueden encontrarse grandes depósitos de turba del permafrost fuera del Ártico y las regiones subárticas, por ejemplo en Mongolia y en la meseta tibetana de Qinghai, donde las cordilleras impiden que el aire cálido del océano se desplace tierra adentro y en invierno las temperaturas son muy bajas^{9,10}.

Las turberas del permafrost están cambiando con rapidez. Hoy el Ártico se calienta a un ritmo que duplica el promedio mundial¹¹. En los últimos decenios, los límites meridionales del permafrost han retrocedido hacia el norte entre 30 y 80 km, con lo que su cobertura se ha reducido notablemente¹²⁻¹⁵. La degradación del permafrost conlleva el riesgo de que la movilización y

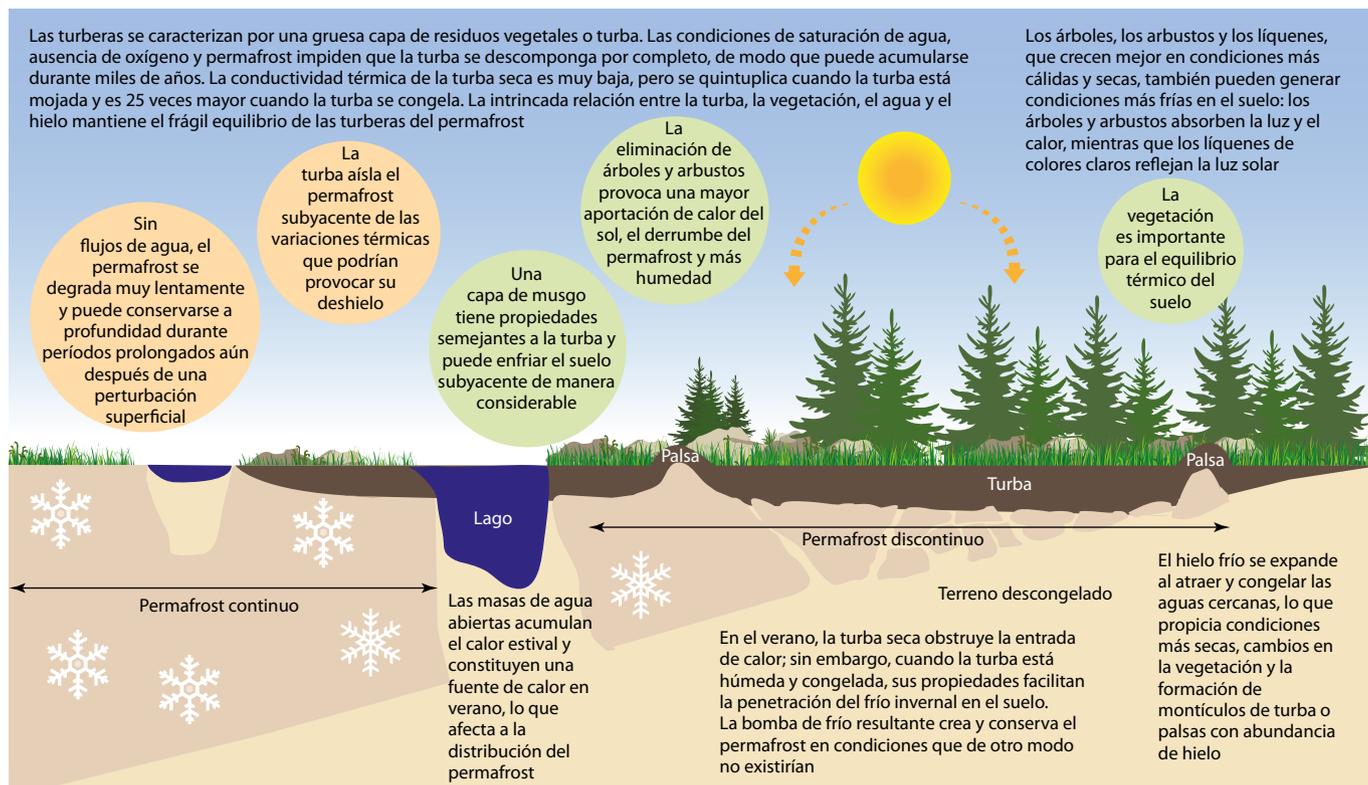
descomposición microbiana de materia orgánica que antes estaba enterrada y congelada podría provocar la liberación de una cantidad significativa de dióxido de carbono y metano, lo que a su vez exacerbaría en gran medida el calentamiento global¹⁶⁻¹⁹. La degradación generalizada del permafrost también tendría efectos de gran calado en los ecosistemas, la hidrología y la infraestructura de las regiones.

Pese a que el permafrost es objeto de un estudio intenso desde hace más de un siglo, es imprescindible seguir investigando sobre su distribución, características y dinámicas a fin de entender mejor cómo reacciona al cambio climático y a las perturbaciones humanas²⁰. En el caso de las turberas con permafrost, nuestro conocimiento es todavía más incompleto. Ni el modo en que las turberas del permafrost reaccionan al cambio climático ni su función colectiva en el cambio climático global se conocen con claridad ni son evidentes, pues la interacción entre el permafrost,

los ecosistemas y el clima es sumamente compleja²⁰⁻²². Por ejemplo, aunque las turberas congeladas (secas) y desheladas (húmedas) presenten índices semejantes de secuestro de carbono y actúen como sumideros de carbono, normalmente sus flujos de gases de efectos invernadero tienen características totalmente diferentes y pueden actuar como fuentes netas de emisiones²³⁻²⁵. Además, las turberas congeladas y desheladas también podrían alternarse con rapidez en el tiempo y el espacio^{23,26}.

El deshielo del permafrost se considera uno de los puntos de inflexión que podría precipitar un efecto invernadero incontenible, o una «Tierra invernadero» incontrolable²⁷. Para evitar una situación tan devastadora, es fundamental que el permafrost del mundo y sus turberas se mantengan helados y retengan los depósitos de carbono.

Las turberas y el permafrost: función de la turba, la flora y el agua



Deshielo del permafrost, descomposición de las turberas e interacciones complejas

En el último decenio, en el Ártico, todos los años han sido más cálidos que el año más cálido del siglo xx¹⁵. A nivel mundial, la temperatura del permafrost no ha dejado de subir en los últimos decenios. Los incrementos más acusados de la temperatura media del permafrost se han observado en las zonas más frías del Ártico, mientras que las subidas han sido mucho más suaves en el permafrost más «cálido» y en las zonas de permafrost discontinuo. En ciertos lugares, las temperaturas del permafrost solo han disminuido ligeramente gracias a que los últimos inviernos han sido fríos^{15,28}.

Debido al aumento de las temperaturas, el deshielo del permafrost con abundancia de hielo o el derretimiento del hielo de fondo generan depresiones características en el paisaje denominadas «termokarst». En los últimos decenios, parece que la formación de termokarst en las turberas se ha acelerado en las zonas de permafrost discontinuo²⁹⁻³¹. No obstante, las observaciones a largo plazo en todo el Ártico no revelan patrones uniformes en el desarrollo de termokarst atribuibles al calentamiento global¹⁵.

Cuando suelos antes congelados se derrumban a causa del deshielo, ese hundimiento posibilita la formación de pequeñas masas de agua que posteriormente quizá se conviertan en lagos. La formación de lagos de termokarst, a su vez, acelera el deshielo del permafrost en mayor profundidad¹⁹. La proliferación de estos lagos, por otra

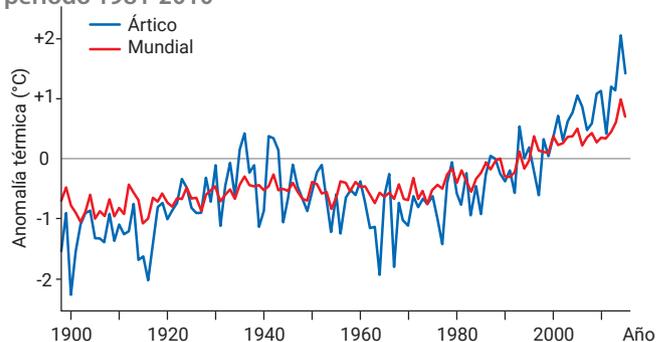
▶ **Vídeo: ¿Qué es el permafrost?**



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=lxxy1u8GjY>
 Fotografía: Muestras cilíndricas recién extraídas de permafrost, Pokhodsck (Rusia)
 Fotografía: Hans Joosten

© Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar und Meeresforschung

Temperatura anual del aire en la superficie en el Ártico (60-90 °N) y mundial en relación con el valor medio en el período 1981-2010



Fuente: Adaptado del Informe sobre el Ártico 2018 de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos¹

parte, podría aumentar la conectividad de las redes de drenaje, lo que favorece el drenaje de los lagos, el rebrote de vegetación, la formación de turba y la recuperación del permafrost³²⁻³⁷. Con estas dinámicas contrapuestas se hace patente la necesidad de entender mejor los posibles efectos de la tendencia al calentamiento.

El cambio climático y la subida de las temperaturas han disparado la incidencia de incendios forestales en el Ártico, donde las llamas se propagan en las regiones de tundra y las limítrofes entre bosque y tundra. Alimentados por los depósitos de turba subyacentes, los incendios liberan enormes cantidades de carbono, destruyen la vegetación y las capas aislantes del suelo, y reducen el albedo —o capacidad de reflectancia— del suelo, de modo que aumentan la vulnerabilidad al cambio climático y el desarrollo generalizado de termokarst³⁸⁻⁴⁴. Incluso en los escenarios más conservadores, se prevé que los efectos combinados del incremento de las temperaturas y los incendios forestales sean especialmente graves en las zonas de permafrost discontinuo, y que las condiciones climáticas se vuelvan desfavorables para todo tipo de permafrost³¹, lo que podría provocar cambios en el tipo de vegetación y su productividad, que a su vez propiciarían nuevos incendios forestales más extensos y frecuentes^{45,46}.

Otro de los efectos del calentamiento cada vez mayor debido al cambio climático es que el deshielo del permafrost podría liberar en el medio ambiente cantidades enormes de metano, un potente gas de efecto invernadero. Aunque las estimaciones de la emisión de metano en el Ártico presentan una gran variabilidad, los modelos actuales de proyección del clima mundial parecen indicar solo ligeros incrementos de las emisiones de metano en la región nórdica con permafrost^{47,48}. Sin embargo, en la mayoría de los modelos no se representan de forma adecuada los procesos de deshielo⁸.



Termokarst



Fotografía: Hans Joosten

El **termokarst** es un elemento del paisaje resultante del derretimiento del hielo de fondo en las regiones donde hay permafrost subyacente, que provoca un hundimiento en la superficie. Entre las formaciones habituales de termokarst se encuentran los lagos, los sumideros, los pozos y las vaguadas en terrenos poligonales^{56,57}. El termokarst tiene una presencia generalizada en las zonas con permafrost discontinuo^{58,59}. También se halla con frecuencia en las zonas mucho más frías de permafrost continuo, donde las brechas del hielo desestabilizan el permafrost^{60,61}.

En un primer momento, la acumulación de agua a causa del termokarst favorece el aumento de calor y la degradación, en una reacción positiva. Por otra parte, el crecimiento de vegetación y la acumulación de materia orgánica limitan gradualmente el deshielo de las capas inferiores. Debido a la nueva y rápida acumulación de turba en las depresiones del termokarst, el deshielo del permafrost no siempre convierte la turbera en una fuente de carbono^{22,23,62}. No obstante, es probable que la humedad del suelo propicie la liberación de metano.

Un estudio reciente sobre la elaboración de modelos evaluó las consecuencias climáticas a largo plazo de la degradación del permafrost teniendo en cuenta los bruscos procesos de deshielo relacionados con los lagos de termokarst de formación reciente. El resultado indica que, en el presente

siglo, la liberación de carbono en forma de metano (CH_4) puede representar una pequeña parte de la liberación total de carbono resultante del deshielo de permafrost, aunque podría provocar hasta un 40% del efecto de calentamiento adicional atribuible al nuevo deshielo de permafrost⁴⁹.

El cambio climático es uno de los numerosos factores que influyen directamente en los cambios en las turberas del permafrost. Toda perturbación del suelo superficial puede provocar la degradación del permafrost, incluidos procesos naturales como los incendios en bosques y tundra, y perturbaciones antropogénicas como el desarrollo de infraestructura industrial y urbana y la actividad de construcción, la minería, el turismo y la agricultura^{50,51}. A menudo, las muchas formas de desarrollo en las turberas del permafrost desatienden las características únicas de esas zonas, con lo que fragmentan el paisaje y alteran el ciclo hidrológico^{14,52}. En Rusia, el 15% del territorio cubierto por la tundra ha sido destruido por las actividades de transporte, lo que ha causado el deshielo del permafrost, erosión, el hundimiento del terreno y el desarrollo de termokarst⁵³. En torno al 45% de los yacimientos de petróleo y gas natural del Ártico ruso se sitúan en las zonas ecológicamente más vulnerables, con frecuencia en turberas, incluidas la región de Pechora, los Urales polares y el noroeste y el centro de Siberia^{54,55}. La creciente demanda de recursos naturales y la mayor accesibilidad a las regiones heladas debido a las condiciones más cálidas pueden dar pie en el futuro a una actividad industrial y de infraestructuras más intensa, con lo que las turberas y el permafrost se verían sometidos a mayores perturbaciones. Los consiguientes cambios también afectarán a los pueblos indígenas que tradicionalmente han dependido del uso de la tierra, por ejemplo de las turberas, para obtener alimento, renos, caza y pesca¹⁴.



Deshielo y hundimiento del permafrost en Mongolia

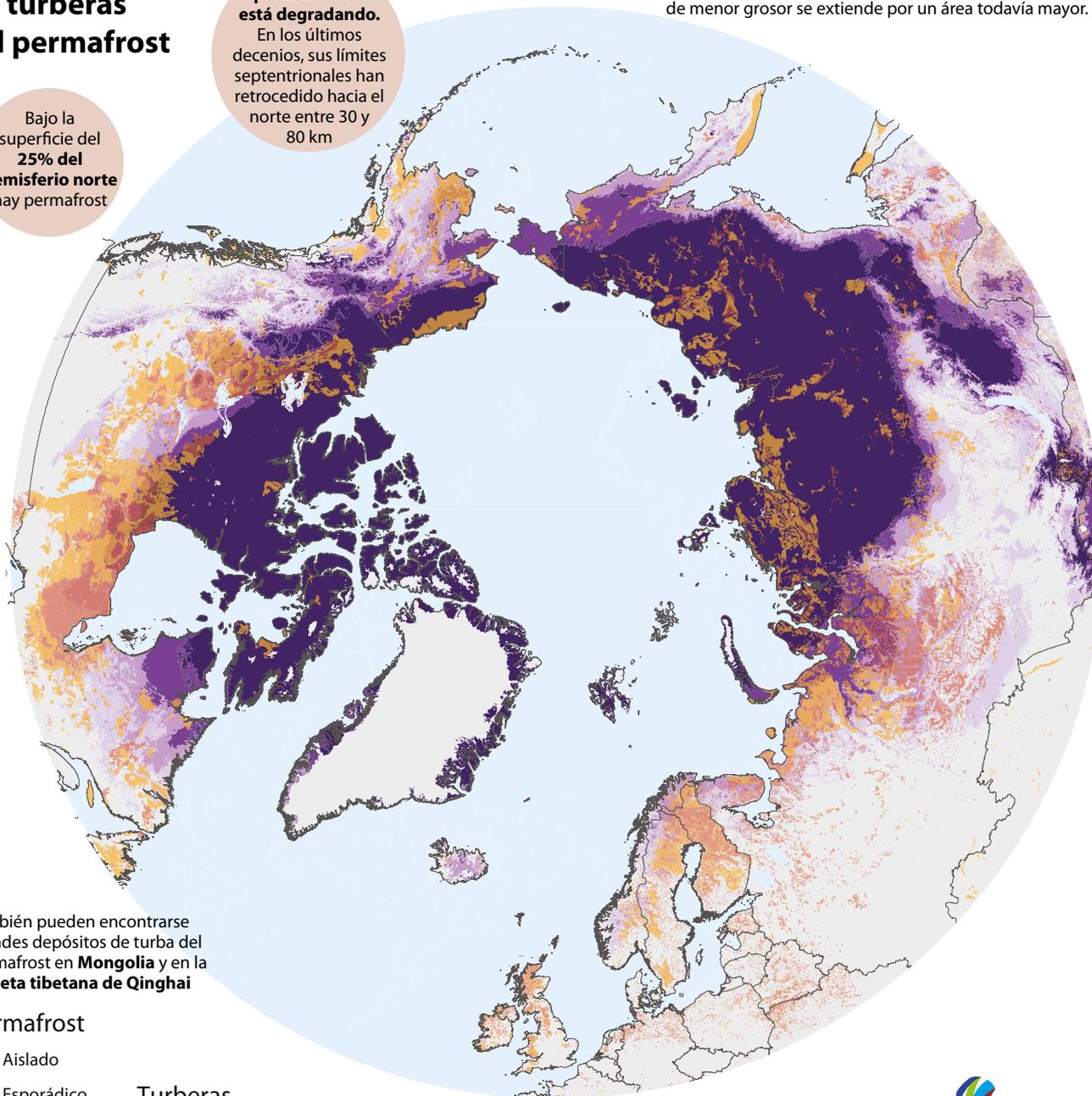
Fotografía: Hans Joosten

Distribución de las turberas del permafrost

Bajo la superficie del **25% del hemisferio norte** hay permafrost

El **permafrost se está degradando**. En los últimos decenios, sus límites septentrionales han retrocedido hacia el norte entre 30 y 80 km

Las **turberas** ocupan enormes superficies en las zonas con permafrost. Turberas del permafrost con una capa de **turba de más de 40 cm** de grosor ocupan una superficie superior a **1,4 millones de km²**, y la turba de menor grosor se extiende por un área todavía mayor.



También pueden encontrarse grandes depósitos de turba del permafrost en **Mongolia** y en la **meseta tibetana de Qinghai**

Permafrost

- Aislado
- Esporádico
- Discontinuo
- Continuo

Turberas

- > 50% de cobertura
- 20-50% de cobertura

Fuentes de datos geoespaciales:

Los datos sobre las turberas han sido facilitados por el Greifswald Mire Centre, Greifswald (Alemania)

Los datos relativos al permafrost han sido facilitados por el Instituto Alfred Wegener del Centro Helmholtz de Investigación Polar y Marina (AWI), Bremerhaven (Alemania)⁹⁰



Las temperaturas del Ártico suben a un ritmo que duplica el promedio mundial

Las turberas son los mayores **depósitos a largo plazo de carbono orgánico** de todos los ecosistemas terrestres

El modelo climático indica que **para 2050 se habrá perdido el 35% del permafrost próximo a la superficie**

Los **arbustos, los árboles** y los **líquenes** mantienen el suelo más frío al absorber o reflejar la luz solar. La retirada de la vegetación protectora puede provocar la rápida degradación del permafrost

El fuego elimina la vegetación que actúa como aislante, la turba y las capas del suelo, con lo que las turberas quedan más expuestas al cambio climático

El calentamiento del Ártico ha propiciado un **aumento del número de incendios** en las regiones de tundra y donde se combinan bosque y tundra, lo que ha causado una reducción significativa del carbono en el suelo

El efecto combinado del calentamiento climático y los **incendios forestales** se exagera en las zonas con permafrost discontinuo

Cuando la turba se descongela a causa del deshielo del permafrost, los descomponedores microbianos se activan y descomponen los materiales orgánicos, de modo que provocan emisiones de CO_2 y metano (CH_4)

Las **masas de agua más profundas** acumulan calor en verano y se convierten en fuentes de calor en invierno, con lo que influyen en la distribución local del permafrost

El **termokarst** es una depresión característica del paisaje debida al deshielo del permafrost o al derretimiento del hielo de fondo

En ausencia de aguas superficiales o subterráneas en movimiento, el permafrost se degrada con mucha lentitud, de modo que perdura a profundidad durante mucho tiempo

El termokarst está muy extendido en las zonas de permafrost discontinuo

Las **turberas** son zonas en cuya superficie se forma una capa de **residuos vegetales** (turba). Las condiciones de saturación de agua y ausencia de oxígeno impiden que la turba se descomponga por completo

Los suelos circumpolares retienen el **50% del carbono del suelo del mundo**, que en su mayor parte se almacena en las turberas y se conserva en forma de permafrost

Los expertos prevén que para 2100 las regiones del permafrost se habrán convertido en una **fuente de carbono**

Los suelos con permafrost, incluidos los depósitos de turba, contienen el **doble de mercurio** que el resto de los suelos del planeta, la atmósfera y los océanos

El deshielo del permafrost podría dar lugar a la liberación de cantidades significativas de **mercurio** en el medio ambiente

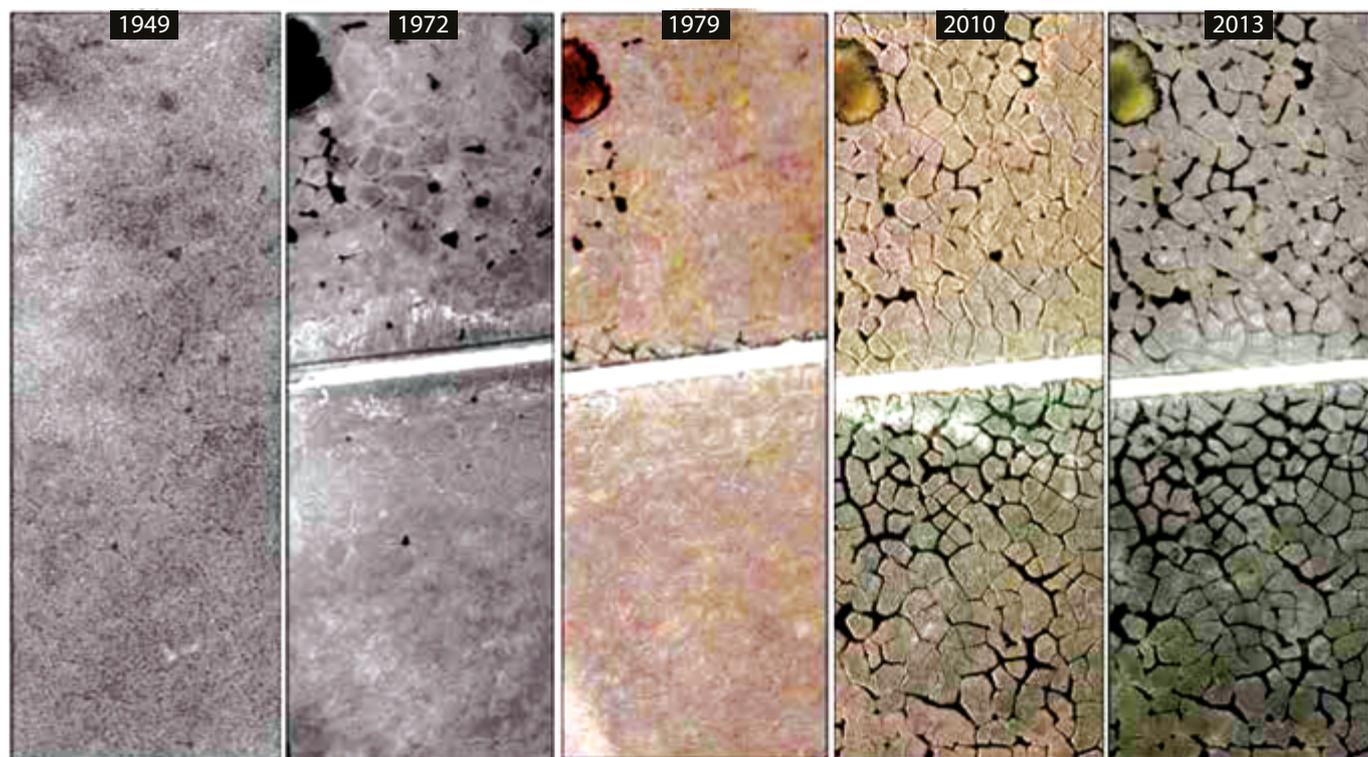
El carbono orgánico del suelo puede liberarse en formas diversas — CO_2 o CH_4 — que se emiten como gases a la atmósfera o como carbono orgánico disuelto o carbono orgánico particulado que es transportado hasta los ríos

Creciente sensibilización acerca de las turberas del permafrost

Desde hace más de un siglo, y de forma más intensa en los últimos decenios, las regiones con permafrost han sido objeto de investigación y desarrollo de tecnología con el propósito de afrontar los retos particulares que plantean para la ciencia y la ingeniería. Pese a los esfuerzos de la International Permafrost Association y de la Red Terrestre Mundial – Permafrost, todavía existen grandes lagunas de conocimiento específico sobre la región y el hábitat, en particular debido a las condiciones climáticas extremas, la escasa accesibilidad y un contexto geopolítico complejo. En una revisión reciente se observó que algo más del 30% de todas las referencias de bibliografía científica referentes a experimentos de campo en el Ártico provienen de las inmediaciones de solo dos estaciones de investigación: el lago Toolik, en Alaska (Estados Unidos), y Abisko, en Suecia⁶³. Este hecho podría sesgar el consenso científico y propiciar predicciones poco precisas sobre los efectos del cambio climático en el Ártico.

A raíz de la creciente sensibilización sobre el cambio climático y el deshielo del Ártico, las últimas evaluaciones tratan cada vez más de abarcar aspectos como el cambio socioecológico, los cambios de régimen y el rol de la acción humana en la adaptación y la transformación^{64,65}. Se están desarrollando proyectos de investigación que abordan las consecuencias del deshielo y la degradación del permafrost. Entre ellos se encuentra la iniciativa sobre el desarrollo del Ártico y la adaptación al permafrost en transición (ADAPT), que colabora con 15 laboratorios del Canadá y otros grupos de investigadores con el propósito de desarrollar un marco científico integrado para los sistemas Tierra del Ártico canadiense. Leyes específicas, como la ley del Extremo Norte aprobada en Ontario en 2010, se combinan con nuevas iniciativas de planificación encaminadas a abrir y proteger el Extremo Norte por medio de un proceso de planificación del uso de la tierra en consulta con las Primeras Naciones⁶⁶.

En el Consejo Ártico hallamos un ejemplo de intensa cooperación internacional que ha resultado especialmente útil para generar



Progresión de la formación de termokarst debido al deshielo del permafrost entre 1949 y 2013 en un centro de estudio situado en la bahía de Prudhoe, Alaska (Estados Unidos). La línea blanca se corresponde con el eje vial construido en 1969.

Fuente: Walker et al. (2014)⁵²

y aumentar los conocimientos con vistas a la formulación de políticas nacionales e internacionales, por ejemplo con su informe de 2017 relativo a la nieve, el agua, el hielo y el permafrost del Ártico^{15,67}. Si bien es cierto que los Estados del Ártico son custodios fundamentales de la región, también se requiere el esfuerzo de otros agentes en aras de la protección y el conocimiento de las turberas del permafrost. Diversas organizaciones internacionales como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático —por medio de su Informe Especial sobre el Océano y la Criosfera en un Clima Cambiante—, la Organización Meteorológica Mundial y el Consejo Internacional de Ciencias —a través del Comité Científico Internacional del Ártico— se han involucrado cada vez más con ánimo de entender las consecuencias de los cambios ambientales en el Ártico y sensibilizar al respecto.



El deshielo del permafrost propició la formación de termokarst en las turberas próximas a Narian-Mar, en la región autónoma de Nenets (Rusia)

Fotografía: Hans Joosten



La ley del Extremo Norte de Ontario y la función de las Primeras Naciones en la protección de las turberas del permafrost

Entre 50-57 °N y 79-94 °W se encuentra el **Extremo Norte de Ontario** (Canadá), un paisaje dinámico que alberga biomas árticos, boreales y templados. Las turberas dominan el paisaje: cubren el 47% de los 21 millones de hectáreas del Extremo Norte y almacenan aproximadamente 36 gigatoneladas de carbono en forma de turba⁶⁸, lo que representa la tercera parte del carbono almacenado en todas las turberas del Canadá.

Aprobada en octubre de 2010, la **ley del Extremo Norte de Ontario** reconoce la importante función del Extremo Norte en el almacenamiento del carbono y su capacidad de secuestro, y contempla la planificación del uso comunitario de la tierra como estrategia para combatir el cambio climático^{66,69}. La ley se centra en el rol significativo de las Primeras Naciones —pueblos aborígenes del Canadá distintos de los mestizos o los inuit— en la planificación del uso de la tierra, en la que se consideran aspectos culturales, sociales, ecológicos y económicos.

De conformidad con la ley, la **estrategia de uso de la tierra en el Extremo Norte** pretende ayudar a elaborar planes de uso comunitario de la tierra y a integrar cuestiones cuyo alcance va más allá de las zonas de planificación particulares, por ejemplo los conocimientos de los pueblos indígenas. En la estrategia se describen cuatro objetivos:

1. Una función significativa de las Primeras Naciones en la planificación.
2. La protección de los sistemas ecológicos y las zonas con valor cultural del Extremo Norte mediante la inclusión de al menos 225.000 km² de la región en una red interconectada de áreas protegidas establecidas en los planes de uso comunitario de la tierra.
3. El mantenimiento de la diversidad biológica y de los procesos y funciones ecológicas, incluido el almacenamiento y secuestro de carbono en el Extremo Norte.
4. La habilitación de un desarrollo económico sostenible que beneficie a las Primeras Naciones.

Pese a que se preveía completar la estrategia en 2016, el proceso todavía está en curso, dirigido por las Primeras Naciones interesadas en colaboración con el Ministerio de Recursos Naturales y Silvicultura de Ontario. Se han aprobado algunos planes sobre el uso comunitario de la tierra, se han elaborado los borradores de otros, mientras que algunos todavía se están preparando o ni siquiera se han iniciado⁷⁰. Aunque se han hecho progresos, todavía no se sabe a ciencia cierta cómo se alcanzarán algunos objetivos de la ley, por ejemplo en el ámbito de la gobernanza y, sobre todo, en relación con los conocimientos científicos. Es imprescindible entender cómo afecta el cambio climático al secuestro y el almacenamiento de carbono en las turberas del Extremo Norte, así como a los procesos ecológicos conexos, con miras a desarrollar políticas y respuestas de gestión adecuadas.

Prioridades de conocimiento y ampliación de redes

Existe todavía mucha incertidumbre sobre la velocidad a la que cambiarán las turberas del permafrost y los efectos que tendrán esos cambios a escala local y mundial. Se requiere cooperación internacional para financiar nuevos estudios a largo plazo y concebir estrategias viables que reduzcan las vulnerabilidades. Es preciso que las naciones colaboren en un conjunto de medidas aplicables que reconozcan y apliquen los conocimientos tradicionales y locales, faciliten la colaboración con las partes interesadas y desarrollen redes de observación eficaces¹⁵. Al mismo tiempo, la divulgación pública y la formación sobre los riesgos, los efectos probables y las posibles opciones de adaptación resultarán claves de cara a una gobernanza y unas políticas fundamentadas.

Si bien ya existe una red de estaciones de observación que facilita información sobre los patrones generales del cambio del permafrost, la distribución espacial de esos centros es muy irregular. En concreto, la red presenta grandes lagunas en el Ártico central canadiense y el Ártico central siberiano, Groenlandia, el extremo nororiental de Rusia, la meseta tibetana y la región subártica^{30,63}. Para evaluar de manera oportuna la situación global del permafrost es necesario ampliar las redes de investigación a



Imagen obtenida por satélite el 19 de julio de 2016 en la que se aprecia un humo denso sobre las turberas del permafrost al norte de la zona central de Rusia. Los puntos rojos indican temperaturas superficiales elevadas, probablemente a causa de incendios en la turba.

Fotografía: Observatorio de la Tierra de la NASA/Jesse Allen y Joshua Stevens

fin de contar con una red de seguimiento más integral. Esa red ampliada debería diseñarse, a ser posible, para facilitar el acceso de todas las partes interesadas, desde los científicos especializados en el clima hasta la ciudadanía en general; e incluir el uso de medidas normalizadas y bases de datos de fácil acceso^{15,64}. Los países con zonas de permafrost amplias se beneficiarían de la elaboración de planes de adaptación que evalúen los posibles riesgos y prevean estrategias de mitigación de los daños y costos de la degradación del permafrost⁶⁴.

Las turberas del permafrost, puntos clave del carbono, constituyen un entorno especial, muy diverso y dinámico en el que tienen lugar relaciones complejas entre el carbono del suelo, la hidrología, el permafrost, la vegetación y el ser humano. Los principales déficits de conocimiento son la escasa comprensión de la interrelación entre los procesos y la insuficiencia de estudios y modelos actuales. Hacen falta más estudios sobre la ubicación precisa de las turberas con permafrost, cómo evolucionan y cuál es su potencial de liberación. Han de incluirse en los modelos climáticos las emisiones de carbono derivadas de la movilización del carbono del permafrost. A fin de describir mejor la respuesta y retroacción de las turberas del permafrost al cambio climático será fundamental impulsar investigaciones que no se limiten a una sola disciplina. Para ello habrá que tratar de integrar las observaciones sobre el terreno y llevar a cabo estudios retrospectivos (o



Vídeo: Restauración de turberas en Rusia para prevenir incendios y mitigar el cambio climático



Enlace: https://www.youtube.com/watch?v=QZ5qu_nPHYM
Fotografía: Incendio en la tundra de abedul enano de la República de Komi (Rusia)

© Wetlands International
Fotografía: Hans Joosten

▶ **Vídeo: Las turberas: regulación del clima y biodiversidad**



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=ZcxZ9gvNf5U>
Fotografía: Palsas llanas en la República de Komi (Rusia)

© Naturstyrelsen
Fotografía: Hans Joosten

paleoambientales), labores de teleobservación y modelos dinámicos^{22,30}. La complejidad física de las turberas del permafrost y los notables riesgos potenciales de su degradación y alteración también demandan un enfoque más holístico en la planificación y gestión del uso de la tierra, para lo cual se requieren conocimientos más integrados y apropiados de los planificadores y los encargados de formular políticas.

El Ártico ya está cambiando de manera significativa. Aunque se aplique plenamente el Acuerdo de París conforme a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, es probable que a finales del presente siglo el entorno del Ártico sea bastante diferente del actual¹⁵. El carácter casi ineludible de los efectos aceleradores hace todavía más urgente la necesidad de adoptar estrategias de adaptación local y regional centradas en esos ecosistemas nortños que albergan una gran cantidad de carbono. Gestionar con sensatez las turberas del permafrost resultará esencial para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, reducir las vulnerabilidades humanas y ecológicas y fomentar la resiliencia climática a largo plazo.



Cenagal entre palsas cerca de Noyabrsk, al oeste de Siberia (Rusia)

Fotografía: Franziska Tanneberger

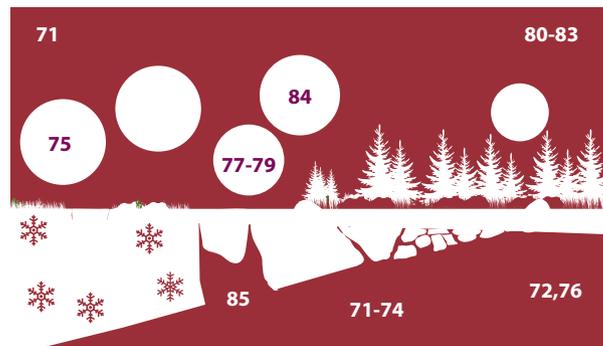
Bibliografía

1. Leifeld, J. and Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications* 9, 1071. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-03406-6>
2. Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23(2), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
3. Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J.W., Schuur, E.A.G., Ping, C.L. et al. (2014). Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences* 11, 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>
4. Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J. et al. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520, 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
5. Strauss, J., Schirmer, L., Grosse, G., Fortier, D., Hugelius, G., Knoblauch, C. et al. (2017) Deep Yedoma permafrost: a synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth-Science Reviews* 172, 75–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007>
6. Brown, J., Ferrians, O., Heginbottom, J.A. and Melnikov, E. (2002). *Circumpolar Arctic map of permafrost and ground-ice conditions, Version 2*. Colorado, USA: National Snow and Ice Data Center. https://nsidc.org/fgdc/maps/ipa_browse.html
7. Ballantyne, C.K. (2018). *Periglacial geomorphology*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
8. Olefeldt, D., Goswami, S., Grosse, G., Hayes, D., Hugelius, G., Kuhry, P. et al. (2016). Circumpolar distribution and carbon storage of thermokarst landscapes. *Nature Communications* 7, 13043. <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms13043>
9. Brown, R.J.E. (1960). The distribution of permafrost and its relation to air temperature in Canada and the USSR. *Arctic* 13(3), 163–177. <http://pubs.aina.ucalgary.ca/arctic/Arctic13-3-163.pdf>
10. Gravis, G.F., Melnikov, E.S., Guo, D., Li, S., Li, S., Tong, B. et al. (2003). Principles of classification and mapping of permafrost in Central Asia. *8th International Conference on Permafrost 2003*. Arenson, L.U., Springman, S.M. and Phillips, M. (eds.). AA Balkema Publishers. 297–302
11. Overland, J.E., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., Kim, S.J., Walsh, J.E., Wang, M. et al. (2017). Surface Air Temperature. Arctic Report Card: Update for 2017. <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2017/ArtMID/7798/ArticleID/700/Surface-Air-Temperature>
12. Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1535. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
13. Park, H., Kim, Y. and Kimball, J.S. (2016). Widespread permafrost vulnerability and soil active layer increases over the high northern latitudes inferred from satellite remote sensing and process model assessments. *Remote Sensing of Environment* 175, 349–358. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.rse.2015.12.046>
14. Minayeva, T., Sirin, A., Kershaw, P. and Bragg, O. (2018). Arctic peatlands. In *The Wetland Book II: Distribution, Description, and Conservation*. by Finlayson, C.M., Milton, G.R., Prentice, R.C. and Davidson, N.C. (eds.). Dordrecht, NL: Springer 1–15. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4001-3_109
15. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017a). *Snow, water, ice and permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Snow-Water-Ice-and-Permafrost-in-the-Arctic-SWIPA-2017/1610>
16. Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Bowden, W.R., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J.G. et al. (2013). Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. *Climate Change* 119(2), 359–374. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0730-7>
17. Koven, C.D., Schuur, E.A.G., Schädel, C., Bohn, T.J., Burke, E.J., Chen, G. et al. (2015). A simplified, data-constrained approach to estimate the permafrost carbon–climate feedback. *Phil. Trans. R. Soc. A* 373, 20140423. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0423>
18. Schädel, C., Bader, M.K.F., Schuur, E.A.G., Biasi, C., Bracho, R., Capek, P. et al. (2016). Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils. *Nature Climate Change* 6, 950–953. <https://www.nature.com/articles/nclimate3054>
19. Walter Anthony, K., Schneider von Deimling, T., Nitze, I., Frolking, S., Emond, A., Daanen, R. et al. (2018). 21st-century modeled permafrost carbon emissions accelerated by abrupt thaw beneath lakes. *Nature Communications* 9(1), 3262. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05738-9>
20. Grosse, G., Goetz, S., McGuire, A.D., Romanovsky, V.E. and Schuur, E.A.G. (2016). Changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth system. *Environmental Research Letters* 11, 040201. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/040201>
21. Shur, Y.L. and Jorgenson, M.T. (2007). Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafrost and Periglacial Processes* 18, 7–19. <https://doi.org/10.1002/ppp.582>
22. Swindles, G.T., Morris, P.J., Mullan, D., Watson, E.J., Turner, E., Roland, T.P. et al. (2015). The long-term fate of permafrost peatlands under rapid climate warming. *Nature Scientific Reports* 5, 17951. <https://doi.org/10.1038/srep17951>
23. Gao, Y. and Couwenberg, J. (2015). Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: steady long-term rates in spite of shifts between dry and wet conditions. *Global Change Biology* 21(2), 803–815. <https://doi.org/10.1111/gcb.12742>
24. Ström, L., Ekberg, A., Mastepanov, M. and Christensen, T.R. (2003). The effect of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland. *Global Change Biology* 9(8), 1185–1192. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00655.x>
25. Turetsky, M.R., Wieder, R.K., Vitt, D.H., Evans, R.J. and Scott, K.D. (2007). The disappearance of relict permafrost in boreal North America: effects on peatland carbon storage and fluxes. *Global Change Biology* 13(9), 1922–1934. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01381.x>
26. De Klerk, P., Donner, N., Karpov, N. S., Minke, M. & Joosten, H. 2011. Short-term dynamics of a low-centred ice-wedge polygon near Chokurdakh (NE Yakutia, NE Siberia) and climate change during the last ca. 1250 years. *Quaternary Science Reviews*, 30, 3013–3031. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.06.016>

27. Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D. et al. (2018). Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
28. Hartfield, G., Blunden, J. and Arndt, D.S. (eds.) (2018). State of the climate in 2017. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99(8), Si-5332. <https://doi.org/10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1>
29. Baltzer, J.L., Veness, T., Chasmer, L.E., Sniderhan, A.E. and Quinton, W.L. (2014). Forests on thawing permafrost: fragmentation, edge effects, and net forest loss. *Global Change Biology* 20(3) 824-834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12349>
30. Carpino, O.A., Berg, A.A., Quinton, W.L. and Adams, J.R. (2018). Climate change and permafrost thaw-induced boreal forest loss in northwestern Canada. *Environ. Res. Lett.* 13, 084018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad74e>
31. Gibson, C.M., Chasmer, L.E., Thompson, D.K., Quinton, W.L., Flannigan, M.D. and Olefeldt, D. (2018). Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands. *Nature Communications* 9(1), 3041. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05457-1>
32. Jones, B.M., Grosse, G., Arp, M.C., Jones, K.M., Walter, A. and Romanovsky, V.E. (2011). Modern thermokarst lake dynamics in the continuous permafrost zone, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research* 116, G00M03. <https://doi.org/10.1029/2011JG001666>
33. Jones, M.C., Grosse, G., Jones, B.M. and Walter Anthony, K.M. (2012). Peat accumulation in drained thermokarst lake basins in continuous, ice-rich permafrost, northern Seward Peninsula, Alaska. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences* 117, G00M07. <https://doi.org/10.1029/2011JG001766>
34. Jones, B.M. and Arp, C.D. (2015). Observing a catastrophic thermokarst lake drainage in Northern Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes* 26, 119-128. <https://doi.org/10.1002/ppp.1842>
35. Van Huissteden, J., Berrittella, C., Parmentier, F.J.W., Mi, Y., Maximov, T.C. and Dolman, A.J. (2011). Methane emissions from permafrost thaw lakes limited by lake drainage. *Nature Climate Change* 1, 119-123. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1101>
36. Roach, J., Griffith, B., Verbyla, D. and Jones, J. (2011). Mechanisms influencing changes in lake area in the Alaskan boreal forest. *Global Change Biology* 17, 2567-2583. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02446.x>
37. Jepsen, S.M., Voss, C.I., Walvoord, M.A., Minsley, B.J. and Rover, J. (2013). Linkages between lake shrinkage/expansion and sublacustrine permafrost distribution determined from remote sensing of interior Alaska, USA. *Geophysical Research Letters* 40, 882-887. <https://doi.org/10.1002/grl.50187>
38. Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M. and Wotton, M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology* 15(3), 549-560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
39. Jones, B.M., Kolden, C.A., Jandt, R., Abatzoglou, J.T., Urban, F. and Arp, C.D. (2009). Fire behavior, weather, and burn severity of the 2007 Anaktuvuk river tundra fire, North Slope, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 41, 309-316. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-41.3.309>
40. Hu, F.S., Higuera, P.E., Walsh, J.E., Chapman, W.L., Duffy, P.A., Brubaker, L.B. et al. (2010). Tundra burning in Alaska: Linkages to climatic change and sea ice retreat. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 115, G04002. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JG001270>
41. Hu, F.S., Higuera, P.E., Duffy, P.A., Chipman, M.L., Rocha, A.V., Young, A.M. et al. (2015). Arctic tundra fires: natural variability and responses to climate change. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13(7), 369-377. <https://doi.org/10.1890/150063>
42. Mack, M.C., Bret-Harte, M.S., Hollingsworth, T.N., Jandt, R.R., Schuur, E.A.G., Shaver, G.R. et al. (2011). Carbon loss from an unprecedented Arctic tundra wildfire. *Nature* 475, 489-492. <https://www.nature.com/articles/nature10283>
43. Kelly, R., Chipman, M.L., Higuera, P.E., Stefanova, I., Brubaker, L.B. and Hu, F.S. (2013). Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 110, 13055-13060. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305069110>
44. Rupp, T.S., Duffy, P., Leonawicz, M., Lindgren, M., Breen, A., Kurkowski, T. et al. (2016). Climate scenarios, land cover, and wildland fire. In Zhu, Z. and McGuire, A.D. (eds.), *Baseline and projected future carbon storage and greenhouse-gas fluxes in ecosystems of Alaska*. USGS Professional Paper 1826, 17-52
45. Bret-Harte, M.S., Mack, M.C., Shaver, G.R., Huebner, D.C., Johnston, M., Mojica, C.A. et al. (2013). The response of Arctic vegetation and soils following an unusually severe tundra fire. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20120490. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0490>
46. Arctic Climate Impact Assessment (2005). *Impacts of a warming Arctic: Arctic climate impact assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
47. Riley, W.J., Subin, Z.M., Lawrence, D.M., Swenson, S.C., Torn, M.S., Meng, L. et al. (2011). Barriers to predicting changes in global terrestrial methane fluxes: analyses using CLM4Me, a methane biogeochemistry model integrated in CESM. *Biogeosciences* 8, 1925-1953. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1925-2011>
48. Gao, X., Schlosser, C.A., Sokolov, A., Walter Anthony, K., Zhuang, Q. and Kicklighter, D. (2013). Permafrost degradation and methane: low risk of biogeochemical climate-warming feedback. *Environmental Research Letters* 8(3), 035014. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035014>
49. Schneider von Deimling, T., Grosse, G., Strauss, J., Schirmermeister, L., Morgenstern, A., Schaphoff, S. et al. (2015). Observation-based modelling of permafrost carbon fluxes with accounting for deep carbon deposits and thermokarst activity. *Biogeosciences* 12(11), 3469-3488. <https://doi.org/10.5194/bg-12-3469-2015>
50. Grosse, G., Harden, J., Turetsky, M., McGuire, A.D., Camilli, P., Tarnocai, C. et al. (2011). Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *Journal of Geophysical Research* 116, G00K06. <https://doi.org/10.1029/2010JG001507>
51. Instanes, A., Anisimov, O., Brigham, L., Goering, D., Khrestalev, L.N., Ladanyi, B. et al. (2005). Infrastructure: buildings, support systems, and industrial facilities. In *ACIA: Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 908-944.
52. Walker, D.A., Raynolds, M.K., Buchhorn, M. and Peirce, J.L. (eds.) (2014). *Landscapes and permafrost changes in the Prudhoe Bay Oilfield, Alaska*. Alaska Geobotany Center Publication AGC 14-01. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks. https://www.geobotany.uaf.edu/library/pubs/WalkerDA2014_agc14-01.pdf

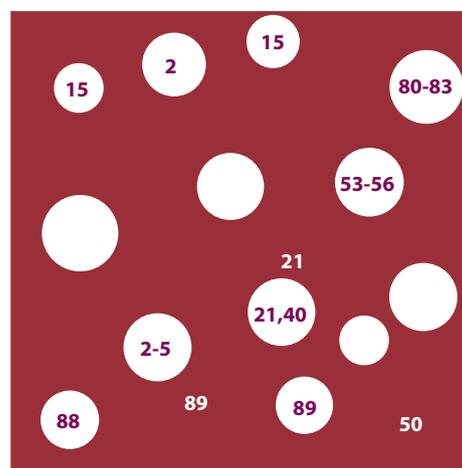
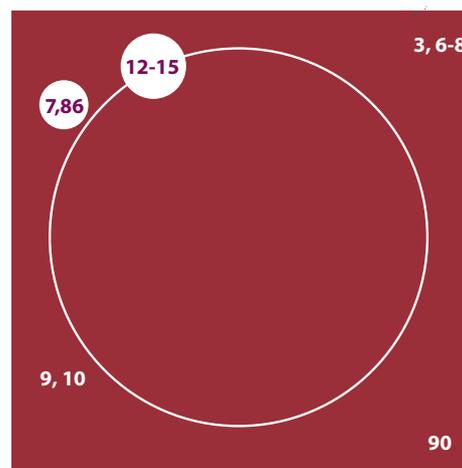
53. Vlassova, T. (2002). Human impacts on the tundra-taiga zone dynamics: the case of the Russian lesotundra. *Ambio Special Report*, 12, 30–36.
54. Instanes, A. (2016). Incorporating climate warming scenarios in coastal permafrost engineering design – Case studies from Svalbard and northwest Russia. *Cold Regions Science and Technology* 131, 76–87. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.004>
55. Shiklomanov, N.I., Streletskiy, D.A., Swales, T.B. and Kokorev, V.A. (2017). Climate change and stability of urban infrastructure in Russian permafrost regions: Prognostic assessment based on GCM climate projections. *Geographical Review* 107, 125–142. <https://doi.org/10.1111/gere.12214>
56. Jorgenson, T., Shur, Y.L. and Osterkamp, T.E. (2008). Thermokarst in Alaska. *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost* 1, 869–876. Fairbanks, AK: University of Alaska Fairbanks
57. Kokelj, S.V. and Jorgenson, M.T. (2013). Advances in thermokarst research. *Permafrost and Periglacial Processes* 24, 108–119. <https://doi.org/10.1002/ppp.1779>
58. Jorgenson, M.T., Racine, C.H., Walters, J.C. and Osterkamp, T.E. (2001). Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska. *Climatic Change* 48, 551–579. <https://doi.org/10.1023/A:100566742>
59. Halsey, L.A., Vitt, D.H. and Zoltai, S.C. (1995). Initiation and expansion of peatlands in Alberta, Canada. *Climate, landscape and vegetation change in the Canadian Prairie Provinces Proceedings* 45–53. Edmonton, Alberta: Canadian Forestry Service. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/18992.pdf>
60. Jorgenson, M.T., Shur, Y.L. and Walker, H.J. (1998). Evolution of a permafrost-dominated landscape on the Colville River Delta, northern Alaska. *Proceedings of Seventh International Conference on Permafrost, Collection Nordicana* 57, 523–529.
61. Fortier, D. and Allard, M. (2004). Late Holocene syngenetic ice-wedge polygons development, Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41(8), 997–1012. <https://doi.org/10.1139/e04-031>
62. Payette, S., Delwaide, A., Caccianiga, M. and Beauchemin, M. (2004). Accelerated thawing of subarctic peatland permafrost over the last 50 years. *Geophysical Research Letters* 31, L18208. <https://doi.org/10.1029/2004GL020358>
63. Metcalfe, D.B., Hermans, T.D.G., Ahlstrand, J., Becker, M., Berggren, M., Björk, R. G. et al. (2018). Patchy field sampling biases understanding of climate change impacts across the Arctic. *Nature Ecology & Evolution* 2, 1443–1448. <https://www.nature.com/articles/s41559-018-0612-5>
64. United Nations Environment Programme (2012). *Policy implications of warming permafrost*. UNEP : Nairobi. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8533>
65. Arctic Monitoring and Assessment Programme (2017b) *Adaptation actions for a changing Arctic: Perspectives from the Barents area*. Oslo, Norway: AMAP. <https://www.amap.no/documents/doc/Adaptation-Actions-for-a-Changing-Arctic-Perspectives-from-the-Barents-Area/1604>
66. Chetkiewicz, C. and Lintner, A. (2014). *Getting it right in Ontario's Far North: the need for a regional strategic environmental assessment in the Ring of Fire [Wawagajing]*. Canada: Wildlife Conservation Society Canada and Ecojustice Canada. https://www.wcsCanada.org/Portals/96/Documents/RSEA_Report_WCSCanada_Ecojustice_FINAL.pdf
67. Koivuova, T. (2016). Arctic resources: Exploitation of natural resources in the Arctic from the perspective of international law. In *Research Handbooks on International Law and Natural Resources*. Morgera, E. and Kulovesi, K. (eds.) Cheltenham/Northampton: Edward Elgar Publishing. Chapter 17. 349–366. <https://www.elgaronline.com/view/9781783478323.00031.xml>
68. McLaughlin, J.W. and Webster, K. (2013). *Effects of a changing climate on peatlands in permafrost zones: a literature review and application to Ontario's Far North*. Climate Change Research Report CCRN-34. Canada: Ontario Ministry of Natural Resources. <http://www.ontra.on.ca/library/repository/mon/27008/323518.pdf>
69. Legislative Assembly of Ontario (2010). Ontario House Bill 191 2010. An Act with respect to land use planning and protection in the Far North. Ontario. <https://www.ola.org/en/legislative-business/bills/parliament-39/session-2/bill-191>
70. Government of Ontario (2018). Land use planning process in the Far North. Ontario. <https://www.ontario.ca/page/land-use-planning-process-far-north#section-1>

Referencias gráficas



71. Washburn, A.L. (1979). *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. London: Edward Arnold.
72. Kujala, K., Seppälä, M. and Holappa, T. (2008). Physical properties of peat and palsa formation. *Cold Regions Science and Technology* 52, 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.08.002>
73. Vasil'chuk, Y.K. (2013). Syngenetic ice wedges: cyclical formation, radiocarbon age and stable-isotope records. *Permafrost and Periglacial Processes* 24(1), 82–93. <https://doi.org/10.1002/ppp.1764>
74. Harris, S.A., Brouchkov, A. and Cheng, G. (2018). *Geocryology: Characteristics and use of frozen ground and permafrost landforms*. Leiden, NL: CRC Press/Balkema.
75. Burn, C.R. (1998). The response (1958–1997) of permafrost and near-surface ground temperatures to forest fire, Takhini River valley, southern Yukon Territory. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35(2), 184–199. <https://doi.org/10.1139/cjes-35-2-184>
76. Routh, J., Hugelius, G., Kuhry, P., Filley, T., Kaislahti, P., Becher, M. et al. (2014). Multi-proxy study of soil organic matter dynamics in permafrost

- peat deposits reveal vulnerability to climate change in the European Russian Arctic. *Chemical Geology* 368, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.12.022>
77. Soudzilovskaia, N.A., van Bodegom, P.M. and Cornelissen, H.C. (2013). Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation. *Functional Ecology* 27, 1442–1454. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12127>
 78. Porada, P., Ekici, A. and Beer, C. (2016). Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale. *Cryosphere* 10, 2291–2315. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2291-2016>
 79. Park, H., Launiainen, S., Konstantinov, P.Y., Iijima, Y. and Fedorov, A.N. (2018). Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2018JG004491>
 80. Chapin III, F., Sturm, M., Serreze, M., McFadden, J., Key, J., Lloyd, A. *et al.* (2005). Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science* 310(5748), 657-660. <https://doi.org/10.1126/science.1117368>
 81. Blok, D., Heijmans, M.P.D., Schaepman-Strub, G., Kononov, A.V., Maximov, T.C. and Berendse, F. (2010). Shrub expansion may reduce summer permafrost thaw in Siberian tundra. *Global Change Biology* 16(4), 1296-1305. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02110.x>
 82. Briggs, M.A., Walvoord, M.A., McKenzie, J.M., Voss, C.I., Day-Lewis, F. D. and Lane, J.W. (2014). New permafrost is forming around shrinking Arctic lakes, but will it last? *Geophysical Research Letters* 41(5), 1585–1592. <https://doi.org/10.1002/2014GL059251>
 83. Druel, A., Peylin, P., Krinner, G., Ciais, P., Viovy, N., Pregon, A. *et al.* (2017). Towards a more detailed representation of high-latitude vegetation in the global land surface model ORCHIDEE (ORC-HL-VEGv1.0). *Geoscientific Model Development* 10, 4693–4722. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4693-2017>
 84. Nauta, A.L., Heijmans, M.M.P.D., Blok, D., Limpens, J., Elberling, B., Gallagher, A. *et al.* (2015). Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source. *Nature Climate Change* 5, 67-70. <https://www.nature.com/articles/nclimate2446>
 85. Johansson, M., Christensen, T.R., Åkerman, H.J., and Callaghan, T.V. (2006). What determines the current presence or absence of permafrost in the Torneträsk region, a sub-arctic landscape in northern Sweden? *Ambio* 35, 190-197. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2006\)35\[190:WDTCP0\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2006)35[190:WDTCP0]2.0.CO;2)
 86. Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Ling, F. and Armstrong, R.L. (2003). Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere. In Phillips, M., Springman, S.M. and Arenson, L.U. (eds), *Permafrost, Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Zurich, Switzerland, 21-25 July 2003, Volume 2.
 87. Joosten, H. and Couwenberg, J. (2008) Peatlands and Carbon. In: Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. & Stringer, L. (eds.) *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*, Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 99–117. http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf



88. Abbott, B.W., Jones, J.B., Schuur, E.A.G., Chapin, F.S. III, Bowden, W.B., Bret-Harte, M.S., Epstein, H.E., *et al.* (2016) Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams and wildfire: an expert assessment. *Environmental Research Letters*, 11: 034014. doi: 10.1088/1748-9326/11/3/034014
89. Schuster, P. F., Schaefer, K. M., Aiken, G. R., Antweiler, R. C., Dewild, J. F., Gryziec, J. D., Gusmeroli, A., *et al.* (2018). Permafrost stores a globally significant amount of mercury. *Geophysical Research Letters*, 45, 1463–1471. <https://doi.org/10.1002/2017GL075571>
90. Brown, J., O. Ferriars, J. A. Heginbottom, and E. Melnikov. 2002. Circum-Arctic Map of Permafrost and Ground-Ice Conditions, Version 2. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/nsidc.org/data/GGD318/versions/2>



Fotografía: oticki / Shutterstock.com

La fijación de nitrógeno: de la contaminación por el ciclo del nitrógeno a la economía circular del nitrógeno

El reto mundial del nitrógeno

En el *Anuario del PNUMA 2014* se subraya la importancia del exceso de nitrógeno reactivo en el medio ambiente¹. Las conclusiones de dicho informe son alarmantes, no solo por la magnitud y complejidad de la contaminación por nitrógeno, sino también por los escasos progresos que se han hecho de cara a reducirla. Pocas de las soluciones señaladas se han ampliado; entretanto, el mundo sigue bombeando un nitrógeno que contribuye de forma notable a la disminución de la calidad del aire, el deterioro de los entornos terrestres y acuáticos, la exacerbación del cambio climático y la disminución de la capa de ozono²⁻¹⁰. Estos efectos obstaculizan los avances hacia la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, pues afectan a la salud humana, la gestión de recursos, los medios de vida y las economías¹¹⁻¹⁵. Sin embargo, hay motivos para la esperanza. En los últimos cuatro años se han transformado los enfoques de gestión de la contaminación por nitrógeno, por

ejemplo, con nuevas ideas sobre el consumo y la producción encaminadas a afrontar con seriedad el problema del nitrógeno¹⁶⁻²⁴.

El nitrógeno es un elemento extremadamente abundante en la atmósfera de la Tierra. Como molécula N_2 , el nitrógeno es inocuo; de hecho, representa el 78% del aire que respiramos. Los dos átomos de nitrógeno se mantienen unidos gracias a un triple enlace muy sólido ($N\equiv N$) que los hace sumamente estables y químicamente no reactivos. El planeta sale beneficiado, pues el N_2 posibilita la existencia de una atmósfera segura en la que la vida puede prosperar y, al mismo tiempo, se evitan las consecuencias inflamables de un exceso de oxígeno. El interés ambiental del nitrógeno tiene que ver con la conversión del N_2 en otras formas químicamente reactivas. En aras de la sencillez, los científicos se refieren a todas las demás formas del nitrógeno como «nitrógeno fijado» o «reactivo» (N_r)^{11,25}. Existen numerosos tipos de N_r con muchos efectos diferentes —tanto beneficiosos como nocivos—, y ahí es donde surgen las complicaciones.

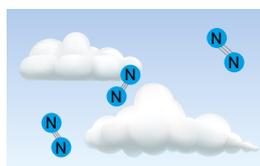
El nitrógeno reactivo es esencial para toda la vida en la Tierra. El amoníaco (NH_3), por ejemplo, es la base de los aminoácidos, las proteínas, las enzimas y el ADN, de modo que es un elemento fundamental en el metabolismo de todas las formas de vida. De igual modo, el óxido nítrico (NO) actúa como compuesto biológico señalizador clave, mientras que el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-) son las principales formas de nutrientes de nitrógeno, imprescindibles para el crecimiento de las plantas. Se observa, por tanto, uno de los principales beneficios que reportan los compuestos de N_r : su contribución a la producción de alimentos y piensos. Por medio del proceso de Haber-Bosch de «fijación» artificial de nitrógeno, el ser humano ha aumentado enormemente la producción de fertilizantes —amoníaco, urea y nitratos— para sostener el crecimiento de la población mundial²⁶. Paralelamente, la humanidad se beneficia de la fijación biológica natural del N_2 en N_r , que llevan a cabo bacterias especializadas que se encuentran en el suelo y guardan relación con las raíces de los cultivos de legumbres.

A esos beneficios se contraponen las numerosas fugas de amoníaco, nitrato, óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O) y muchas otras formas de contaminación por N_r , que provocan múltiples

efectos en el medio ambiente. Esas fugas pueden producirse de forma directa a raíz del uso de fertilizantes; asimismo, el estiércol, los excrementos humanos y otros desechos orgánicos causan enormes pérdidas de N_r en el medio ambiente. Aunque se cree que el porcentaje de N_r que llega al medio ambiente procedente de la fijación biológica del nitrógeno es menor que el causado por el uso de muchos fertilizantes, los excrementos de animales y seres humanos también contribuyen a la contaminación por nitrógeno.

El nitrógeno reactivo también es un subproducto de ciertas actividades humanas. Por ejemplo, en los procesos de combustión de biomasa y combustibles fósiles se liberan NO y NO_2 , que colectivamente se denominan NO_x . Pese a las importantes iniciativas acometidas con ánimo de reducir el NO_x de los vehículos y la generación de energía, las emisiones siguen aumentando en zonas del mundo que se desarrollan con rapidez^{6,12}. En conjunto, los seres humanos están produciendo una combinación de nitrógeno reactivo que pone en peligro la salud, el clima y los ecosistemas, lo que convierte al nitrógeno en uno de los problemas de contaminación más importantes a los que se enfrenta la humanidad. A pesar de ello, la escala del problema todavía se desconoce en gran medida y no se reconoce fuera de los círculos científicos.

Las distintas formas del nitrógeno en el medio ambiente



Dinitrógeno (N_2)

Fuente

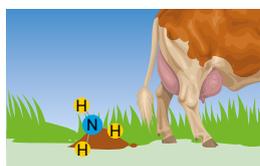
El N_2 constituye el 78% del aire que respiramos.

Beneficios

El N_2 mantiene una atmósfera estable para la vida en la Tierra. El tono azul del cielo se debe a él.

Efectos

El N_2 es inocuo y químicamente no reactivo.



Amoníaco (NH_3)

Fuente

Estiércol, orina, fertilizantes y quema de biomasa.

Beneficios

El NH_3 es la base de los aminoácidos, las proteínas y las enzimas. El amoníaco suele emplearse como fertilizante.

Efectos

El NH_3 provoca eutrofización y afecta a la biodiversidad. Forma materia particulada en el aire perjudicial para la salud.



Óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO_2)

Fuente

Combustión de los sectores del transporte, la industria y la energía. El NO y el NO_2 se denominan colectivamente NO_x .

Beneficios

El NO es esencial en la fisiología humana. No se conocen beneficios del NO_2 .

Efectos

El NO y el NO_2 (o NO_x) son importantes contaminantes atmosféricos que provocan cardiopatías y enfermedades respiratorias.



Nitrato (NO_3^-)

Fuente

Aguas residuales, agricultura y oxidación del NO_x .

Beneficios

Se utiliza ampliamente en fertilizantes y explosivos.

Efectos

Forma materia particulada en el aire perjudicial para la salud. En el agua provoca eutrofización.



Óxido nitroso (N_2O)

Fuente

Agricultura, industria y combustión.

Beneficios

Se usa para propulsar cohetes y en las intervenciones médicas como gas hilarante.

Efectos

El N_2O es un gas de efecto invernadero 300 veces más potente que el CO_2 . También provoca la disminución del ozono estratosférico.

Qué sabemos y qué sabemos que desconocemos del nitrógeno

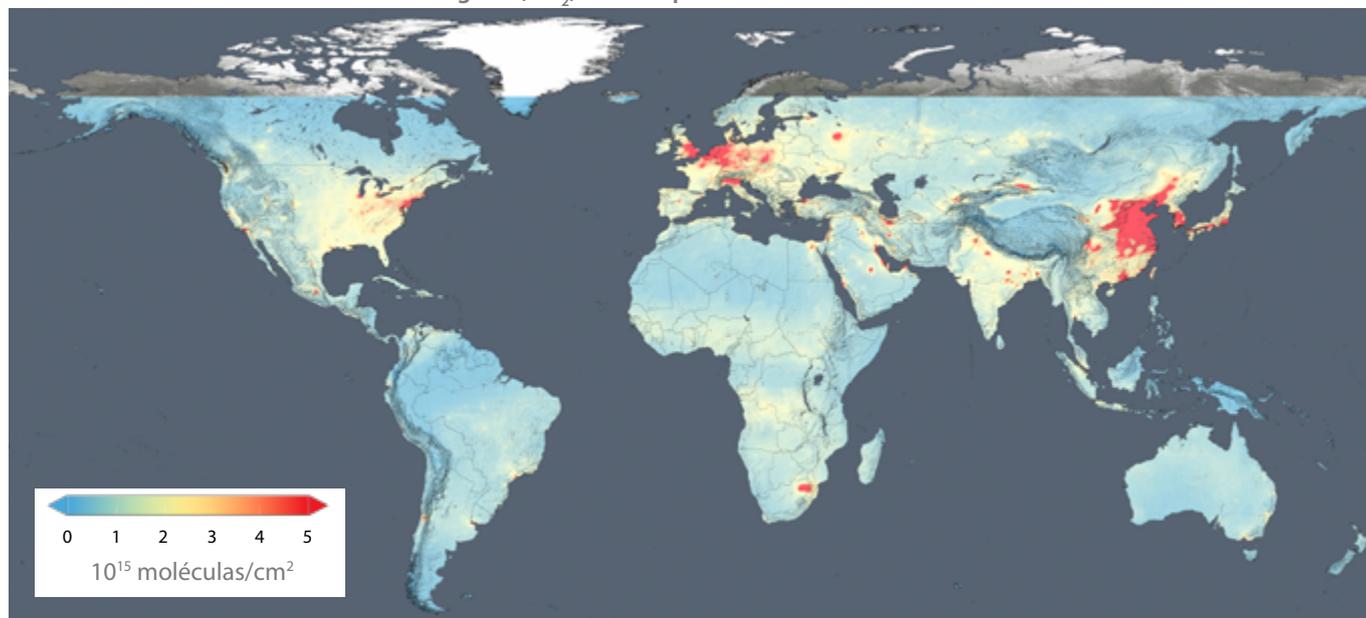
Tanto el ciclo de los compuestos nitrogenados como sus efectos en el ser humano están bien documentados^{4,12,27,28}. Sin embargo, en comparación con el rol del carbono en el cambio climático, apenas se ha generado debate público sobre la necesidad de tomar medidas en relación con el nitrógeno. Es posible medir el incremento de los niveles de compuestos de N_r en la atmósfera sobre las ciudades y las zonas agrícolas, por ejemplo, como NO_x , NH_3 y materia particulada fina o $PM_{2.5}$. Del mismo modo, es posible cuantificar los niveles elevados de NO_3^- en las aguas subterráneas situadas bajo las zonas agrícolas de varias regiones del mundo, así como en los cauces fluviales de bajada en ciudades donde apenas se tratan las aguas residuales, o no se tratan en absoluto. La concentración atmosférica del gas de efecto invernadero N_2O aumenta a un ritmo cada vez mayor. La conclusión evidente es que el ser humano está alterando profundamente el ciclo global del nitrógeno, lo que provoca múltiples formas de contaminación y consecuencias y hace del N_r un contaminante clave que hay que combatir a escala local y mundial²².

En la Evaluación Europea del Nitrógeno se detectaron cinco amenazas principales derivadas de la contaminación por

compuestos nitrogenados: la calidad del agua, la calidad del aire, el equilibrio de los gases de efecto invernadero, los ecosistemas y la biodiversidad, y la calidad del suelo⁴. Se puso de manifiesto que la contaminación por nitrógeno no es en sí misma un problema nuevo, sino que su gestión debe inscribirse en la búsqueda de una solución a los numerosos problemas ambientales que existen. En relación con la producción de alimentos, el uso mundial del nitrógeno es sumamente ineficiente^{20,29}. Considerando toda la cadena alimentaria, solo alrededor del 20% del N_r que se aporta a los cultivos acaba en los alimentos para consumo humano^{11,17}. Por tanto, nada menos que el 80% se desperdicia en forma de contaminación y N_2 , lo que demuestra que la contaminación por N_r representa una pérdida enorme de recursos muy valiosos.

Aunque en el pasado las iniciativas se centraron en un enfoque fragmentado entre las diversas formas de N_r , considerar a todas conjuntamente reporta varias ventajas. En primer lugar, nos permite empezar a analizar las sinergias y contrapartidas entre los beneficios del N_r y los diferentes tipos de contaminación por N_r . En segundo lugar, igualmente importante, nos anima a cuantificar el costo social de todos los efectos de la contaminación por nitrógeno para fundamentar las políticas e informar a la opinión pública^{13,30}. Las estimaciones de costos pueden orientar las políticas de mitigación, pese a que en realidad somos conscientes

Concentración media de dióxido de nitrógeno (NO_2) en la troposfera en 2014



El NO_2 es un gas que emiten principalmente los vehículos, las centrales eléctricas y la actividad industrial. El NO_2 y otros NO_x reaccionan al entrar en contacto con otros contaminantes atmosféricos con los que forman ozono troposférico, lluvia ácida y materia particulada.

Fotografía: Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA



Vídeo: Salvar los Grandes Lagos de las algas tóxicas



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=b6JzL4NG26k>

© PBS NewsHour

Fotografía: Floración de algas en Pelee Island, en la parte sudoriental del lago Erie
Fotografía: Tom Archer / Michigan Sea Grant (www.miseagrant.umich.edu)

de que desconocemos el costo real de la contaminación por nitrógeno, pues sus consecuencias fundamentalmente no son conmensurables, es decir, resulta difícil dar con una medida común. En cualquier caso, las estimaciones disponibles, basadas en la disposición de las personas a reducir los riesgos de la contaminación por N_r , o las estimaciones de los costos para los ecosistemas y los servicios de salud, resultan ilustrativas e indican un costo anual mundial de aproximadamente entre 340.000 millones y 3,4 billones de dólares de los Estados Unidos¹¹.

No obstante, quizá resulte más revelador hacer un cálculo mucho más sencillo. En el mundo, cada año se desperdician o pierden en el medio ambiente unos 200 millones de toneladas de recursos de N_r , ya sea como N_r o N_2 ^{11,28}. Si multiplicamos esa cifra por el precio nominal de un fertilizante de 1 dólar por kilogramo de N , obtenemos una pérdida de efectivo de aproximadamente 200.000 millones de dólares de los Estados Unidos anuales. Se trata, sin duda, de un estímulo importante para tomar medidas. Este mensaje también resulta pertinente para las zonas con insuficiente N_r , como África Subsahariana, donde reducir la contaminación por N_r ayudaría a que las escasas fuentes disponibles de N_r impulsaran en mayor medida la producción de alimentos³¹. La reconversión de compuestos de N_r en N_2 (lo que se conoce como «desnitrificación») no constituye un modo seguro de evitar la contaminación por N_r ; más bien conlleva la necesidad de nuevas aportaciones de N_r . Es evidente que para aumentar la eficiencia en el uso del nitrógeno para el conjunto de la economía hay que reducir las pérdidas de N_2 y N_r .



Floración de algas (en un tono verde apagado) al oeste del lago Erie, entre el Canadá y los Estados Unidos, el 3 de agosto de 2014. La frecuente floración de las algas del lago Erie se debe a la carga de nitrógeno y fósforo procedente de la escorrentía de fertilizantes y estiércol de tierras agrícolas, a los efluentes de aguas residuales municipales y a la aportación de contaminantes atmosféricos.

Fotografía: Jeff Schmaltz / Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA



Vídeo: La huella humana en la calidad del aire mundial



Enlace: https://www.youtube.com/watch?time_continue=7&v=aMnDoXuTGS4

© Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA

Fotografía: Doin / Shutterstock.com

Consumo de combustibles fósiles en los sectores del transporte, la energía y la industria



La combustión a altas temperaturas de carbono, petróleo y gas natural libera una gran cantidad de N_r en forma de NO y NO_2 , lo que se conoce colectivamente como NO_x

El sector del transporte contribuye a más del 65% de las emisiones de NO_x

El consumo de combustibles fósiles es responsable del 13% de la fijación antropógena del N_2 en N_r



Producción de fertilizantes

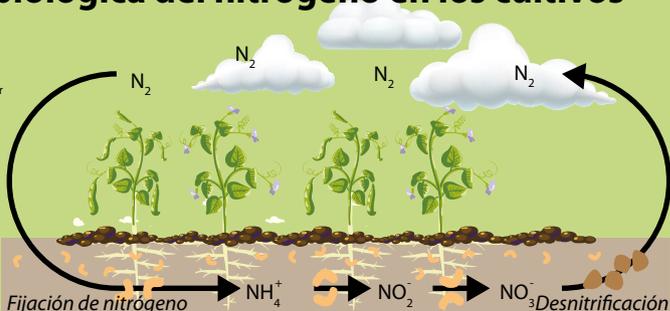
El proceso de Haber-Bosch se inventó hace más de 100 años para satisfacer la creciente demanda de producción industrial de fertilizantes de N_r y explosivos nitrogenados. Del mismo modo que la fijación natural de nitrógeno por acción de las bacterias, **este proceso convierte el N_2 atmosférico en amoníaco (NH_3)**.



La producción de fertilizantes es responsable del 63% de la fijación antropógena de N_2 en N_r

Fijación biológica del nitrógeno en los cultivos

En la naturaleza, el N_2 puede convertirse en N_r debido a los relámpagos y a la fijación biológica del nitrógeno por acción de bacterias fijadoras de nitrógeno

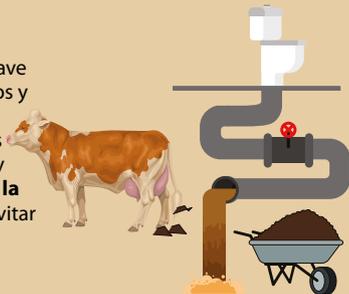


El N_r también puede reconvertirse en N_2 mediante un **proceso biológico de desnitrificación** que realizan las bacterias anaerobias. Estos procesos naturales mantienen el equilibrio del ciclo de nitrógeno; sin embargo, el incremento de los **cultivos fijadores de nitrógeno**, como las legumbres, ha disparado las aportaciones y pérdidas de N_r en el medio ambiente.

La fijación biológica del nitrógeno en la producción de cultivos es responsable del 24% de la conversión de N_2 en N_r

Desechos

Además de la importancia clave de la producción de alimentos y el consumo de combustibles fósiles en la mitigación de las emisiones de N_r , también hay que señalar la **relevancia de la gestión de desechos** para evitar que llegue más N_r al medio ambiente



Las **aguas residuales** y los **desechos alimentarios** contienen proteínas. En torno al **16%** de la **proteína es nitrógeno**

Al contrario de lo que sucede con las aguas residuales, **si es posible evitar** una gran parte de los desechos alimentarios



Los mayores volúmenes de pérdidas y desechos de alimentos corresponden a los **cereales**, la **fruta**, la **verdura**, las **raíces** y los **tubérculos**

Cada año se **pierde o desecha** aproximadamente una **tercera parte de los alimentos que se producen** en el mundo para consumo humano

The Nitrogen Cascade

El 78% del aire es N_2

El óxido **nitroso** (N_2O) es un **gas de efecto invernadero** 300 veces más potente que el CO_2 y daña la capa de ozono

Casi el **80%** de las emisiones antropogénicas de N_2O provienen de la agricultura

El **80%** de las emisiones mundiales de **amoníaco** (NH_3) tienen su origen en actividades humanas, principalmente en la **aplicación de fertilizantes** y en la **cría de animales**

El amoníaco y el ácido nítrico reaccionan y forman **materia particulada** de nitrato de amonio, que conlleva riesgo de enfermedades respiratorias y cardiopatías

Las emisiones de N_2 pueden combinarse con la lluvia, lo que da pie a la **lluvia de ácido nítrico**.

El **50%** de los abonos nitrogenados que se añaden a los campos agrícolas se convierten en **contaminación** o se desperdician mediante su **desnitrificación** y reconversión a N_2

El **nitrato** (NO_3^-) de la actividad agrícola puede filtrarse en el suelo hasta la **capa freática** y afectar a la calidad de los suministros de **agua potable**, con los consiguientes riesgos significativos para la **salud humana**

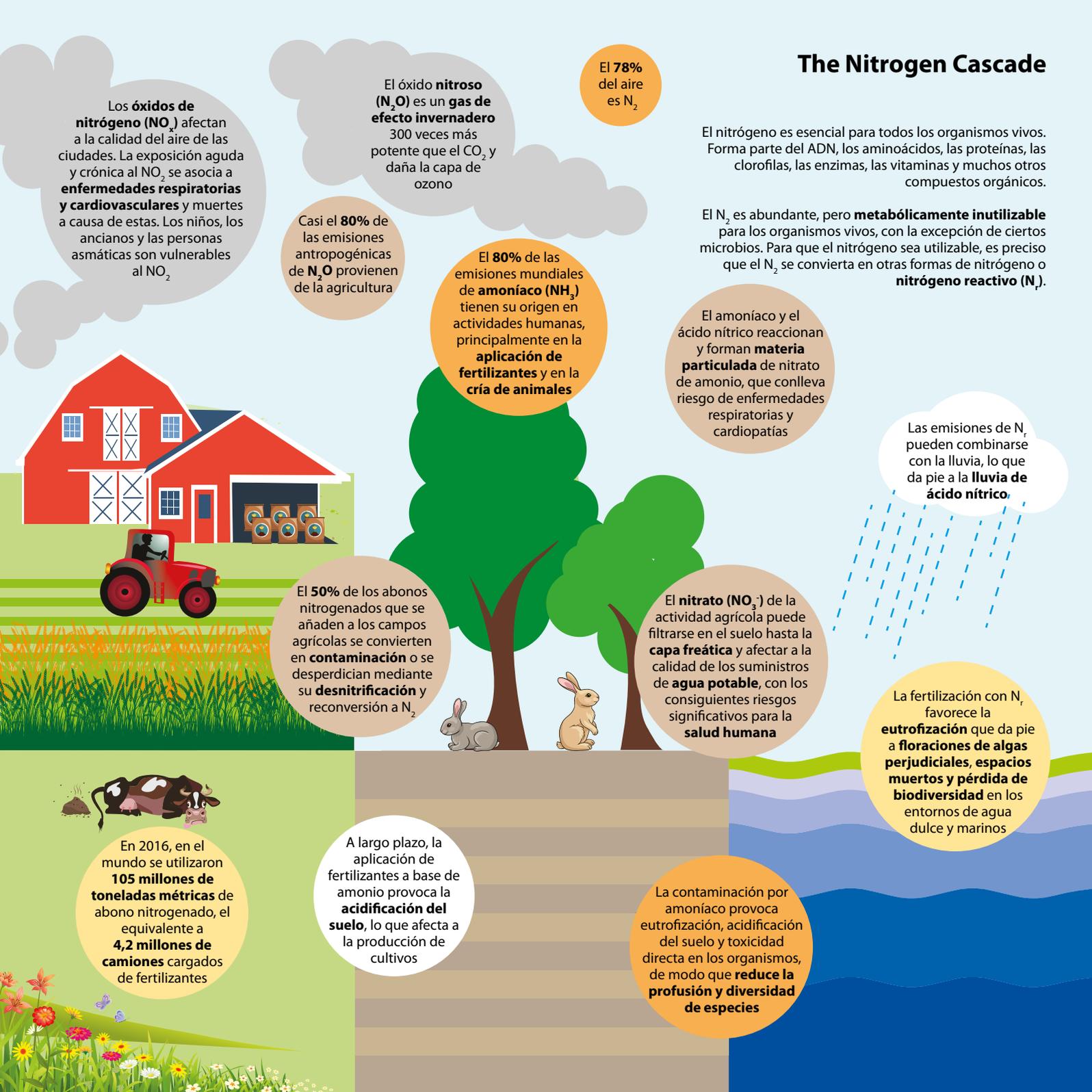
La fertilización con N favorece la **eutrofización** que da pie a **floraciones de algas perjudiciales, espacios muertos y pérdida de biodiversidad** en los entornos de agua dulce y marinos

A largo plazo, la aplicación de fertilizantes a base de amonio provoca la **acidificación del suelo**, lo que afecta a la producción de cultivos

La contaminación por amoníaco provoca eutrofización, acidificación del suelo y toxicidad directa en los organismos, de modo que **reduce la profusión y diversidad de especies**

Los **óxidos de nitrógeno** (NO_x) afectan a la calidad del aire de las ciudades. La exposición aguda y crónica al NO_2 se asocia a **enfermedades respiratorias y cardiovasculares** y muertes a causa de estas. Los niños, los ancianos y las personas asmáticas son vulnerables al NO_2

En 2016, en el mundo se utilizaron **105 millones de toneladas métricas** de abono nitrogenado, el equivalente a **4,2 millones de camiones** cargados de fertilizantes



Fragmentación de las políticas y soluciones de la economía circular

Al igual que los conocimientos científicos sobre el nitrógeno se han fragmentado en compartimentos ambientales y formas de N, lo mismo puede decirse de las políticas relativas al nitrógeno. Los efectos del N_r se hacen notar en diversos ámbitos de políticas, tales como la contaminación atmosférica, el clima, los medios de agua dulce y marinos, la biodiversidad, la salud y la seguridad alimentaria. Esta fragmentación, que se observa de forma generalizada en las políticas de numerosos países, resulta igualmente patente en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Al analizar los ODS y sus indicadores subyacentes se aprecia que el nitrógeno, pertinente en relación con casi todos ellos, es también invisible. El indicador propuesto para el ODS 14.1 referente a la vida acuática es el único indicador que guarda relación con el nitrógeno que se está aplicando en este momento³². Las propuestas para incluir la eficiencia en el uso del nitrógeno o las pérdidas de nitrógeno en el conjunto de indicadores de los ODS todavía no se han aprobado^{20,33}.

Las consecuencias de esta fragmentación de las políticas sobre el ciclo del nitrógeno se hacen patentes en las compensaciones entre políticas. Por ejemplo, las políticas encaminadas a reducir la contaminación del agua por NO₃⁻ en la Unión Europea llevaron a prohibir la aplicación de estiércol en la tierra en determinados «períodos de veda» invernales. Sin embargo, esa medida hizo que se intensificara la aplicación de estiércol en la primavera y el verano, lo que a su vez provocó un incremento del nivel máximo de las concentraciones de amoníaco en la atmósfera³⁴. Este efecto temporal solo se evitó, de manera parcial, en un número reducido de países de la Unión Europea que obligaron a aplicar estiércol con bajas emisiones de NH₃³⁵. Hallamos otro ejemplo en la recomendación de estabular el ganado para reducir las emisiones de N₂O pertinentes para el clima. En cualquier caso, aun cuando se aplicaran las mejores medidas técnicas para moderar las emisiones, esta decisión daría pie, en términos generales, a mayores emisiones de NH₃³⁶. Este tipo de compensaciones también resultan pertinentes al hablar de las fuentes de combustión. Por ejemplo, la introducción en la década de 1990 de catalizadores para reducir las emisiones de NOx propició un aumento de las emisiones de N₂O y NH₃.

Estos ejemplos demuestran que es urgentemente necesario combinar los conocimientos científicos y las políticas sobre el nitrógeno para hacer frente a múltiples amenazas^{11,30,37}. Por ejemplo, el plan de acción del Gobierno de China para evitar el incremento del uso de fertilizantes, de 2015, se propone impedir el auge del uso de fertilizantes sintéticos antes de 2020 sin reducir



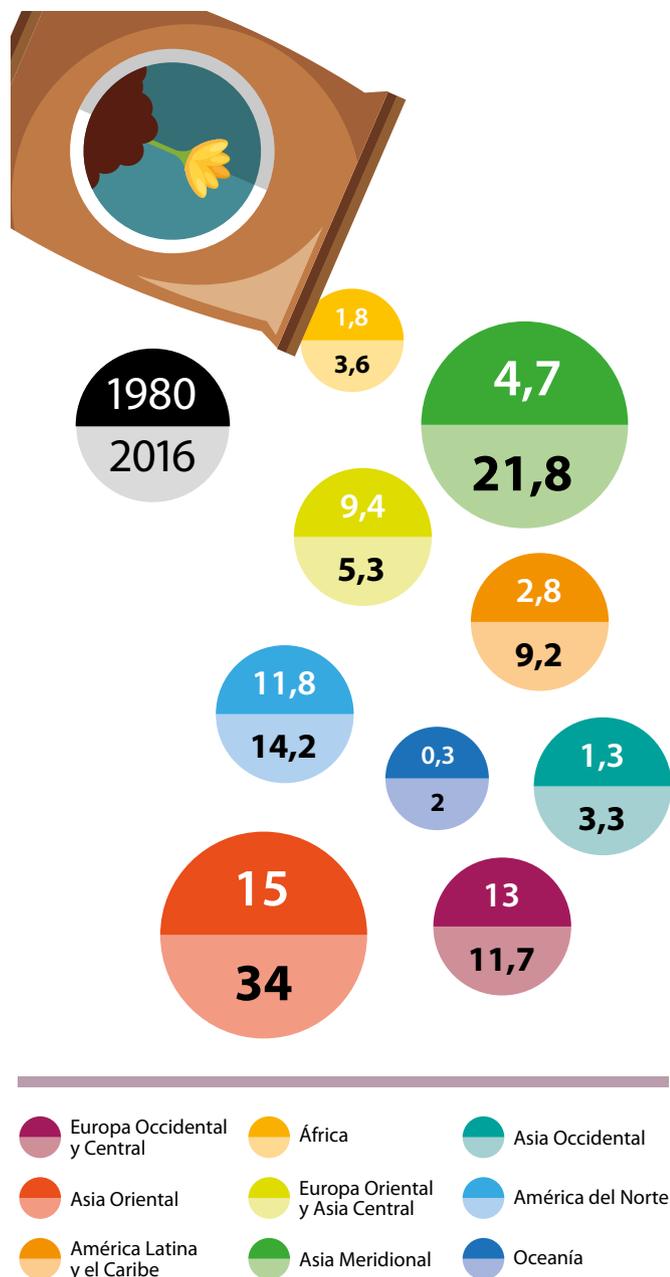
El nitrógeno, los nutrientes y la economía circular

El paquete sobre la economía circular aprobado por la Unión Europea en 2015 tiene el propósito de maximizar la eficiencia en el uso de los recursos en todas las etapas de la cadena de valor —producción, consumo, gestión de derechos y reciclaje de las materias primas de recuperación—^{42,43}. En el plan se reconocen la gestión y el comercio de fertilizantes orgánicos y a partir de desechos como elementos clave para la recuperación y el reciclaje en la economía de la Unión Europea de bionutrientes como el nitrógeno y el fósforo. La nueva regulación alienta la producción sostenible e innovadora de fertilizantes orgánicos con los biorresiduos disponibles en los países, subproductos de los animales como el estiércol seco o digerido y otros residuos agrícolas. En la actualidad, solo el 5% de los desechos orgánicos se reciclan y aplican como fertilizantes en la Unión Europea. Posibilitar la libre circulación entre países de los fertilizantes biológicos propiciaría la creación de un espacio comercial y una cadena de suministro nuevos para las materias primas de recuperación en el territorio de la Unión Europea. Se calcula que con esta medida se crearían unos 120.000 empleos. Se espera que la recuperación del nitrógeno de los biorresiduos reduzca o elimine la necesidad de utilizar abonos nitrogenados sintéticos o inorgánicos, cuya producción tiene una profunda huella de carbono y energética. Al mismo tiempo, ayudaría a reducir las pérdidas de nitrógeno reactivo en el medio ambiente.

La movilización de la economía circular del nitrógeno y otros nutrientes comienza en las explotaciones agrícolas, donde la reducción de esas pérdidas hace posible una aportación más eficaz de nutrientes que favorecen el crecimiento de los cultivos. En ese sentido, es muy necesario facilitar herramientas prácticas que orienten a los agricultores sobre cómo pueden reducir las aportaciones de nitrógeno gracias a la disminución de las pérdidas contaminantes de nitrógeno que se obtiene al aplicar los métodos de mitigación. Esas herramientas deben respaldarse con análisis adecuados del suelo que den seguridad a los agricultores a la hora de reajustar las aportaciones de nutrientes.

Asimismo, existe un enorme margen para ampliar la reutilización del nitrógeno y otros nutrientes con miras a producir productos comercializables con valor añadido. Del mismo modo en que las grandes inversiones están transformando la sociedad en aras de una «economía baja en carbono» (por ejemplo, con las fuentes de energía renovables), el valor del nitrógeno representa una importante oportunidad económica para invertir en favor de una «economía circular del nitrógeno».

Consumo regional de todos los tipos de abonos nitrogenados en 1980 y 2016 (en millones de toneladas métricas)



Fuente de los datos: Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes (<https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>)

la producción de alimentos, con lo que se limitarían todas las formas de contaminación por N_r . Se ha sugerido que el próximo paso debería poner el énfasis en las barreras socioeconómicas relacionadas con las dimensiones de las explotaciones agrícolas, la innovación y la transferencia de información³⁸.

También es fácil imaginar la transformación del ciclo del nitrógeno en la agricultura en un modelo de economía circular del nitrógeno. En ese caso, al mejorarse la eficiencia y reducirse las pérdidas de los fertilizantes, la fijación biológica del nitrógeno, la orina y el estiércol se permitiría que el nuevo nitrógeno llegara a los productos alimentarios y bioenergéticos previstos. Al mismo tiempo, el reprocesamiento de los excrementos de animales y seres humanos para convertirlos en nuevos fertilizantes ofrece la oportunidad de comercializar productos fertilizantes reciclados.

La situación ha sido muy distinta en lo que respecta a las fuentes de combustión de NO_x , pues todas las tecnologías disponibles —por ejemplo, las de reducción catalítica y no catalítica— se centran en la desnitrificación del NO_x para reconvertirlo en N_2 . No obstante, ello conlleva una pérdida enorme de recursos. Al multiplicar las emisiones mundiales de NO_x por el precio de los fertilizantes de N_r obtenemos la cifra de 50.000 millones de dólares de los Estados Unidos anuales, de lo que se deduce que se requieren tecnologías capaces de recapturar el NO_x como $NO_3^{-11,39}$.

En la India, la perspectiva financiera también fundamenta una política gubernamental que desde 2016 exige que todos los fertilizantes de urea se revistan con aceite de margosa a fin de reducir las pérdidas de N_r en el medio ambiente y las pérdidas económicas que suponen las subvenciones a las aplicaciones de urea con fines distintos del agrícola. En ese mismo principio se basa el llamamiento efectuado por el Primer Ministro de la India en noviembre de 2017 a que todos los agricultores reduzcan a la mitad el uso de fertilizantes para 2020, así como el respaldo gubernamental a la Agricultura Natural de Presupuesto Cero (ANPC) en varios estados del país. El movimiento de la ANPC hace hincapié en evitar las costosas aportaciones externas de fertilizantes y plaguicidas, de modo que ayuda a los agricultores a no asumir deudas y favorece alternativas orgánicas para mejorar la materia orgánica del suelo, su biología y fertilidad. En el estado de Andra Pradesh, la rápida difusión de la ANPC entre miles de agricultores entusiastas recibe el apoyo de una alianza entre BNP Paribas, el Programas de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Centro Mundial de Agrosilvicultura (CIIA), por medio del Servicio de Financiación para una India Sostenible (SIFF). Este planteamiento innovador se basa en préstamos que facilitan la inversión y la ampliación y que reembolsa el Gobierno, ya que se ahorrará muchas subvenciones a los fertilizantes cuando su uso se reduzca^{40,41}.

De cara a un enfoque internacional holístico del nitrógeno

Resulta alentador que algunos países estén poniendo a prueba enfoques más integrados para la gestión del nitrógeno. Por ejemplo, Alemania reaccionó con rapidez a la Evaluación Europea del Nitrógeno y comenzó a elaborar una estrategia integrada sobre el nitrógeno^{23,44}. La dificultad para muchos países reside en la división entre diversos ministerios de la respuesta a los peligros del nitrógeno, lo que dificulta la coordinación de las medidas. En el Brasil, la actividad agrícola sigue expandiéndose en grandes superficies, y no se ha atendido expresamente la necesidad de desvincular mejor los cultivos y la cría de animales con efectos sobre el medio ambiente⁴⁵. En el plano internacional, también hay que legislar con claridad y adoptar medidas de políticas sobre las consecuencias transfronterizas del N_r.

Los miembros de la Iniciativa Internacional del Nitrógeno (IIN) han reflexionado profundamente sobre estos retos. La primera medida ha consistido en colaborar con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente con objeto de establecer un enfoque coordinado en relación con el respaldo científico para el desarrollo de políticas internacionales, que se ha plasmado en el Sistema Internacional de Gestión del Nitrógeno (INMS).

Con la ayuda del Fondo para el Medio Ambiente Mundial y 80 organizaciones asociadas, el INMS está elaborando directrices relativas a la gestión del nitrógeno, la integración de los flujos y efectos, la valoración de los costos y beneficios, y posibles

▶ **Vídeo: La contaminación atmosférica procedente de la agricultura**



Enlace: https://www.youtube.com/watch?v=07P_wXTTusi
Fotografía: gillmar / Shutterstock.com

© Unión Europea

▶ **Vídeo: Importancia de los fertilizantes para el medio ambiente y para sus beneficios**



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=5TzzPOy1T3g>
Fotografía: Visual Generation / Shutterstock.com

© Fondo de Defensa del Medio Ambiente

escenarios de futuro relacionados con el nitrógeno. Asimismo, está celebrando exhibiciones regionales con varios países para demostrar cómo puede resultar útil la gestión holística del nitrógeno. Uno de los resultados clave será la primera Evaluación Mundial del Nitrógeno, cuya publicación está prevista para 2022.

El siguiente reto consistirá en elaborar un marco de políticas más consistente sobre el ciclo del nitrógeno, cuya necesidad se aprecia claramente en las numerosas resoluciones pertinentes para el nitrógeno de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente: 2/6 (Acuerdo de París), 2/7 (Productos químicos y desechos), 2/8 (Consumo y producción sostenibles), 2/9 (Residuos de alimentos), 2/10 (Océanos), 2/12 (Arrecifes de coral), 2/24 (Degradación de las tierras), 3/4 (Medio ambiente y salud), 3/6 (Suelos), 3/8 (Calidad del aire) y 3/10 (Contaminación del agua)^{46,47}. Su propósito se expone con claridad en la Resolución 3/8, que alienta a los Gobiernos a aprovechar los efectos sinérgicos de la gestión eficiente del nitrógeno para reducir la contaminación atmosférica, marina y del agua.

En los últimos debates de las comunidades científicas y sobre políticas se ha analizado el modo de coordinar con más eficacia la participación en las políticas relativas al nitrógeno⁴⁸. A continuación se enumeran algunas de las posibilidades:

Opción 1: Fragmentación del nitrógeno en diversos marcos de políticas: la situación actual

Opción 2: Liderazgo en el ámbito del nitrógeno de acuerdo con un marco de políticas previo. Plantea dificultades en relación con el mandato, dado que los acuerdos ambientales multilaterales vigentes solo abordan determinados elementos del reto.

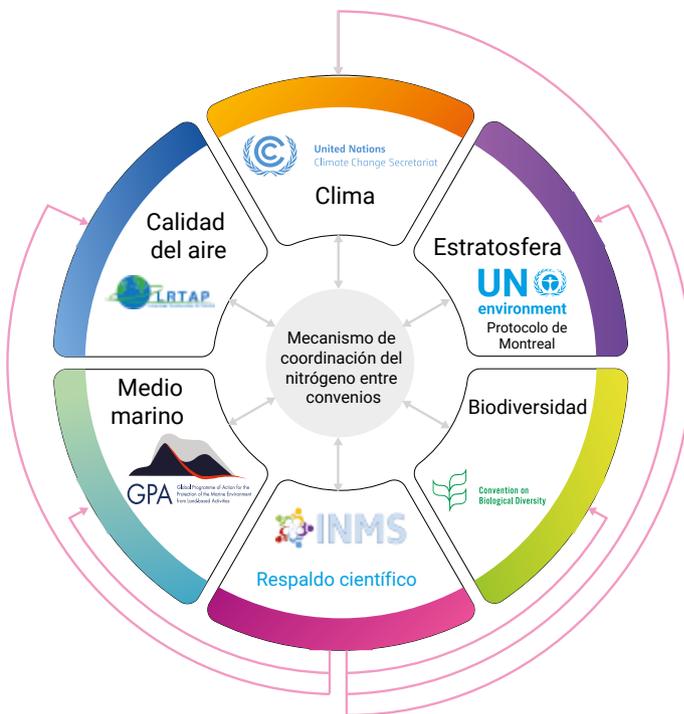
Opción 3: Nuevo convenio internacional para hacer frente al reto del nitrógeno. En este momento se observa poca disposición a aceptar este enfoque.

Opción 4: Un «mecanismo de coordinación del nitrógeno entre convenios» con el que se establezca un foro intergubernamental de cooperación entre organismos sobre la cuestión del nitrógeno, quizá bajo el mandato de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente.

Actualmente no existe tal mecanismo de coordinación, lo que limita la medida en que los acuerdos ambientales multilaterales aprenden unos de otros; además, no es eficiente que el INMS tenga que trabajar por separado con diversos acuerdos multilaterales. Contar con un mecanismo de coordinación serviría para hacer partícipes activos a los Estados Miembros y a los acuerdos ambientales multilaterales pertinentes. Los grupos principales y las partes interesadas del PNUMA ya facilitan la participación de las empresas y la sociedad civil. Cabe señalar que la opción 4 todavía no es más que eso: otra opción más. Corresponde a los Gobiernos nacionales debatir qué enfoque resultaría más ágil, eficiente y rentable.

Sin embargo, de ese debate surge otro beneficio. Cada vez es más evidente que la sociedad mundial necesita un enfoque holístico de los conocimientos científicos y las políticas referentes al nitrógeno. En primer lugar, una perspectiva con múltiples fuentes y sectores posibilita sinergias y la consideración de compensaciones. Resultaría provechosa para la agricultura y la industria, que dispondrían de un fundamento más consistente de cara a la adopción de decisiones empresariales. En segundo lugar, el enfoque holístico sienta las bases para desarrollar la perspectiva de la economía circular, fundamental con vistas a impulsar el cambio. Además, con un planteamiento de ese tipo en la cuestión del nitrógeno se demostraría que es posible que las futuras políticas ambientales coordinen de manera más eficaz cuestiones diversas. En un momento en el que el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente trabaja en pro de su estrategia para «Un planeta sin contaminación», es probable que se extraigan lecciones especialmente relevantes para las cuestiones de contaminación interrelacionadas.

Mecanismo de coordinación del nitrógeno entre convenios



Video: El reto del amoníaco en la agricultura



Enlace: <https://www.youtube.com/watch?v=y0IG5mOWyAs>
Fotografía: Mark Sutton

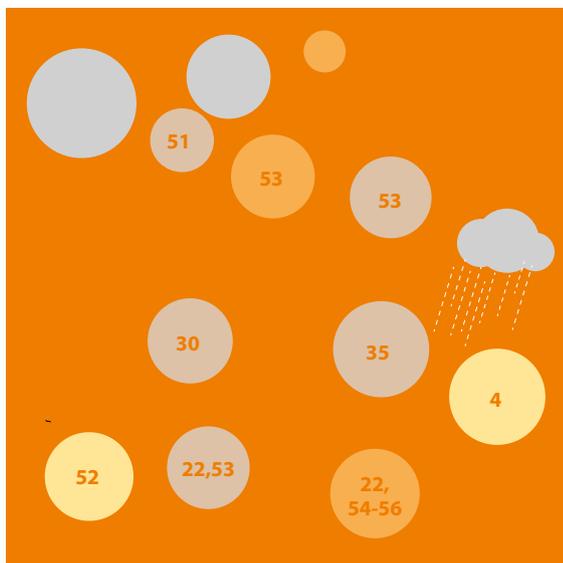
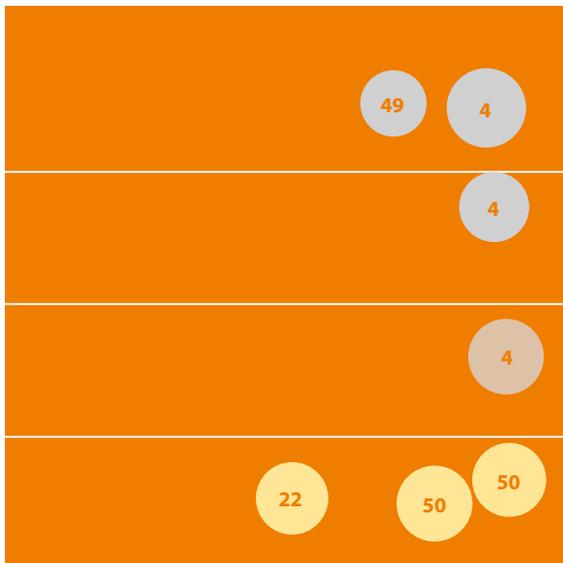
© CAFREtv

Bibliografía

- United Nations Environment Programme (2014). *UNEP Year Book 2014*. Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9240>
- Duce, R.A., LaRoche, J., Altieri, K., Arrigo, K.R., Baker, A.R., Capone, D.G. *et al.* (2008). Impacts of atmospheric anthropogenic nitrogen on the open ocean. *Science* 320, 893–897. <https://doi.org/10.1126/science.1150369>
- Voss, M., Bange, H.W., Dippner, J.W., Middelburg, J.J., Montoya, J.P. and Ward, B. (2013). The marine nitrogen cycle: recent discoveries, uncertainties and the potential relevance of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368, 20130121–20130121. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0121>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erismán, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P. van Grinsven, H. and Grizzetti, B. (eds.) (2011). *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <http://www.nine-esf.org/node/360/ENA-Book.html>
- Pearce, F. (2018). Can the world find solutions to the nitrogen pollution crisis? *Yale Environment* 360, 6 February. <http://e360.yale.edu/features/can-the-world-find-solutions-to-the-nitrogen-pollution-crisis>
- Liu, X., Zhang, Y., Han, W., Tang, A., Shen, J., Cui, Z. *et al.* (2013). Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature* 494, 459–462. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11917>
- Fowler, D., Steadman, C.E., Stevenson, D., Coyle, M. Rees, R.M. Skiba, U.M. *et al.* (2015). Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 13849–13893. <https://doi.org/10.5194/acp-15-13849-2015>
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. and Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525, 367–371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- United Nations Environment Programme (2013). *Drawing Down N₂O to Protect Climate and the Ozone Layer: A UNEP Synthesis Report*. Alcamo, J., Leonard, S.A., Ravishankara, A.R. and Sutton, M.A. (eds.) Nairobi. <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8489>
- Suddick, E.C., Whitney, P., Townsend, A.R. and Davidson, E.A. (2012). The role of nitrogen in climate change and the impacts of nitrogen–climate interactions in the United States: foreword to thematic issue. *Biogeochemistry* 114, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9795-z>
- Sutton, M.A., Bleeker, A., Howard, C.M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W. *et al.* (2013). Our nutrient world: the challenge to produce more food and energy with less pollution. Edinburgh, UK: NERC/Centre for Ecology & Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/500700/>
- Abrol, Y.P., Adhya, T.K., Aneja, V.P., Raghuram, N., Pathak, H., Kulshrestha, U., Sharma, C. and Singh, B. (eds.) (2017). *The Indian Nitrogen Assessment: Sources of Reactive Nitrogen, Environmental and Climate Effects, Management Options, and Policies*. UK: Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128118368/the-indian-nitrogen-assessment>
- Van Grinsven, H.J.M., Holland, M., Jacobsen, B.H., Klimont, Z., Sutton, M.A. and Willems, W.J. (2013). Costs and benefits of nitrogen for Europe and implications for mitigation. *Environmental Science & Technology* 47, 3571–3579. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es303804g>
- Organisation for Economic Cooperation and Development (2018). *Human Acceleration of the Nitrogen Cycle: Managing Risk and Uncertainty*. Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307438-en>
- Brunekreef, B., Harrison, R.M., Künzli, N., Querol, X., Sutton, M.A., Heederik, D.J.J. *et al.* (2015) Reducing the health effect of particles from agriculture. *Lancet Respiratory Medicine* 3(11), 831–832. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(15\)00413-0](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(15)00413-0)
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Wagner, S., De Marco, A., Murphy-Bokern, D. *et al.* (2014). Food choices, health and environment: Effects of cutting Europe's meat and dairy intake. *Global Environmental Change* 26, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.02.004>
- Westhoek, H., Lesschen, J.P., Rood, T., Leip, A., Wagner, S., De Marco, A. *et al.* (2015). *Nitrogen on the Table: The influence of food choices on nitrogen emissions and the European environment*. European Nitrogen Assessment Special Report on Nitrogen and Food. UK: Centre for Ecology & Hydrology. https://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/Nitrogen_on_the_Table_Report_WEB.pdf
- Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B.J., Lassaletta, L. *et al.* (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 519–525. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0>
- Brownlie W.J., Howard, C.M., Pasda, G., Nave, B., Zerulla, W. and Sutton, M.A. (2015). Developing a global perspective on improving agricultural nitrogen use. *Environmental Development* 15, 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.05.002>
- EU Nitrogen Expert Panel (2015). *Nitrogen Use Efficiency (NUE) - an indicator for the utilization of nitrogen in food systems*. Wageningen, NL: Wageningen University. <http://www.eunep.com/wp-content/uploads/2017/03/N-ExpertPanel-NUE-Session-1.pdf>
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Brownlie, W.J., Skiba, U., Hicks, K.W., Winiwarter, W. *et al.* (2017). The European Nitrogen Assessment 6 years after: What was the outcome and what are the future research challenges? In *Innovative Solutions for Sustainable Management of Nitrogen*. Dalgaard, T. *et al.* (eds). Aarhus, Denmark, 25–28 June. Aarhus, DK: Aarhus University and the dNmark Research Alliance. http://sustainableconference.dnmark.org/wp-content/uploads/2017/06/JYC_Final_Book-of-abstracts160617.pdf
- Reis, S., Bekunda, M. Howard, C.M., Karanja, N. Winiwarter, W., Yan, X. *et al.* (2016). Synthesis and review: Tackling the nitrogen management challenge: from global to local scales. *Environmental Research Letters* 11, 120205. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/12/120205/meta>
- Umweltbundesamt (2015). *Reactive Nitrogen in Germany: Causes and effects - measures and recommendations*. Dessau-Roßlau: The German Environment Agency (Umweltbundesamt). <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/reactive-nitrogen-in-germany>

24. Tomich T.P., Brodt, S.B., Dahlgren, R.A. and Scow, K.M. (eds.) (2016). Davis, CA: University of California Press. <http://asi.ucdavis.edu/programs/sarep/research-initiatives/are/nutrient-mgmt/california-nitrogen-assessment>
25. Galloway J.N., Townsend, A.R., Erisman, J.W., Bekunda, M., Cai, Z., Freney, J.R. et al. (2008). Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions and Potential Solutions. *Science* 320, 889-892. <https://doi.org/10.1126/science.1136674>
26. Erisman, J.W., Sutton, M.A., Galloway, J., Klimont, Z. and Winiwarter, W. (2008). How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience* 1, 636-639. <https://doi.org/10.1038/ngeo325>
27. Davidson, E.A., Davidson, M.B., David, J.N., Galloway, C.L., Goodale, R., Haeuber, J.A. . (2012). Excess nitrogen in the U.S. environment: trends, risks, and solutions. 15. The Ecological Society of America, Washington. <http://www.esa.org/esa/wp-content/uploads/2013/03/issuesinecology15.pdf>
28. Fowler, D., Coyle, M., Skiba, U., Sutton, M.A., Cape, J.N., Reis, S. (2013). The global nitrogen cycle of the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society, B*. 368, 2130164. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>
29. Bleeker, A., Sutton, M., Winiwarter, W. and Leip, A. (2013) *Economy Wide Nitrogen Balances and Indicators: Concept and Methodology*. OECD, Environment Directorate, Environment Policy Committee, Working Party on Environmental Information, Paris, France ENV/EPOC/WPEI(2012)4/REV1. Paris. <http://inms.iwlearn.org/inms-meeting-lisbon/NBalancesandIndicators.pdf>
30. Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H. and Winiwarter, W. (2011). Too much of a good thing. *Nature* 472, 159-161. <https://doi.org/10.1038/472159a>
31. Masso, C., Baijukya, F., Ebanyat, P., Bouaziz, S., Wendt, J., Bekunda, M. et al. (2017). Dilemma of nitrogen management for future food security in sub-Saharan Africa – a review. *Soil Research* 55(6), 425-434. <https://doi.org/10.1071/SR16332>
32. United Nations Statistic Division (2018). *Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York. A/RES/71/313 E/CN.3/2018/2. <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/>
33. Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P. and Shen, Y. (2015). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature* 528, 51-59. <https://doi.org/10.1038/nature15743>
34. Sutton, M.A., Reis, S., Riddick, S.N., Dragosits, U., Nemitz, E., Theobald, M.R. et al. (2013). Toward a climate-dependent paradigm of ammonia emission & deposition. *Phil. Trans. Roy. Soc. (Ser. B)* 368, 20130166. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0166>
35. Van Grinsven, H.J., Tiktak, A. and Rougoor, C.W. (2016). Evaluation of the Dutch implementation of the nitrates directive, the water framework directive and the national emission ceilings directive. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 78, 69-84. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.03.010>
36. Bittman, S., Dedina, M., Howard C.M., Oenema, O. and Sutton, M.A. (eds.) (2014). Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/510206/1/N510206CR.pdf>
37. Gu, B.J., Ju, X.T., Chang, J., Ge, Y. and Vitousek, P.M. (2015). Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China. 112, 8792-8797. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510211112>
38. Ju, X.T., Gu, B.J., Wu, Y.Y. and Galloway, J.N. (2016). Reducing China's fertilizer use by increasing farm size. 41, 26-32. <https://doi.org/10.1073/pnas.1806645115>
39. Mangano E., Kahr, J., Wright, P.A. and Brandani, S. (2016). Accelerated degradation of MOFs under flue gas conditions. *Faraday Discussions*, 192. <https://doi.org/10.1039/C6FD00045B>
40. Food and Agriculture Organization (2016). Zero Budget Natural Farming in India. *Agroecology Knowledge Hub Trends in Biosciences Circular Economy Package: Questions & Answers*. 2 December. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>.
41. Bishnoi, R. and Bhati, A. (2017) An Overview : Zero Budget Natural Farming. *Trends in Biosciences* 10(46), 9314-9316
42. European Commission (2015). Circular Economy Package: Questions & Answers. 2 December. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-15-6204_en.htm
43. European Commission (2015). Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. COM(2015) 614 final. <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2015-0614-final>
44. Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015). *Nitrogen: Strategies for resolving an urgent environmental problem - Summary*. Berlin. https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/EN/02_Special_Reports/2012_2016/2015_01_Nitrogen_Strategies_summary.html
45. Austin, A.T., Bustamante, M.M.C., Nardoto, G.B., Mitre, S.K., Perez, T., Ometto, J.P.H.B. et al. (2013). Latin America's Nitrogen Challenge. *Science* 340, 149. <https://doi.org/10.1126/science.1231679>
46. United Nations Environment Programme (2018). *Resolutions and Decisions: UNEA 2*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/resolutions-and-decisions-unea-2>
47. United Nations Environment Programme (2018). *Documents: Third session of the UN Environment Assembly*. Nairobi. <http://web.unep.org/environmentassembly/node/40741>
48. Sutton, M. (2018). The global nitrogen challenge: a case of too much and too little nutrients. A presentation to the Committee of Permanent Representatives to the United Nations Environment Programme, 24 October 2018. <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26379/Sutton%20Global%20Nitrogen%20Challenge%20%28UNEP%20CPR%20Oct%202018%29.pdf?sequence=24&isAllowed=y>

Referencias gráficas



49. Zhang, R., Tie, X. and Bond, D.W. (2002). Impacts of anthropogenic and natural NOx sources over the U.S. on tropospheric chemistry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(4), 1505-1509. <https://doi.org/10.1073/pnas.252763799>
50. FAO (2011). *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf>
51. Ussiri D., Lal R. (2013) *Global Sources of Nitrous Oxide*. In: *Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5364-8_5
52. IFA (2018). *International Fertilizer Association database (IFASTAT)*. International Fertilizer Association, Paris. <https://www.ifastat.org/>
53. Behera, S.N., Sharma, M., Aneja, V.P. and Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 8092-8131. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>
54. Field, C.D., Dise, N.B., Payne, R.J., Britton, A.J., Emmett, B.A., Helliwell, R.C., Hughes, S, et al. 2014. The Role of Nitrogen Deposition in Widespread Plant Community Change Across Semi-natural Habitats. *Ecosystems*, 17, 864-877. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9765-5>
55. Payne, R. J., N. B. Dise, C. J. Stevens, D. J. Gowing, and Begin Partners. 2013. 'Impact of Nitrogen Deposition at the Species Level'. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(3): 984–87. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214299109>
56. Sheppard, L. J., Leith, I. D., Mizunuma, T., Cape, N., Crossley, A., Leeson, S., Sutton, M.A., Dijk, N. and Fowler, D. (2011). Dry deposition of ammonia gas drives species change faster than wet deposition of ammonium ions: evidence from a long-term field manipulation'. *Global Change Biology*, 17: 3589-3607. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02478.x>





*Inundación de Bangkok (Tailandia) en 2011
Fotografía: Wutthichai / Shutterstock.com*

Inadaptación al cambio climático: evitar las trampas de la senda evolutiva

Definición de la adaptación y la inadaptación al contexto del cambio climático

Las metáforas son fundamentales para el pensamiento lógico. Tal como se utilizan en la investigación y las políticas sobre el cambio climático, los términos «adaptación» e «inadaptación» tienen su origen en la biología evolutiva¹. En esencia, en cada generación de una especie aparecen de manera espontánea mutaciones genéticas cuyo éxito o fracaso, y por consiguiente el de la especie, viene determinado por un proceso de selección natural forzado por el entorno. Esta idea puede aplicarse a las bacterias, la flora y la fauna, los ecosistemas e incluso la conducta humana. Una característica importante de una adaptación eficaz es la capacidad evolutiva, es decir, de seguir evolucionando en aras de la adaptación a medida que las condiciones del entorno varían². En la biología evolutiva, una de las características definitorias de la inadaptación es la carencia de capacidad evolutiva. Se trata de un callejón sin salida.

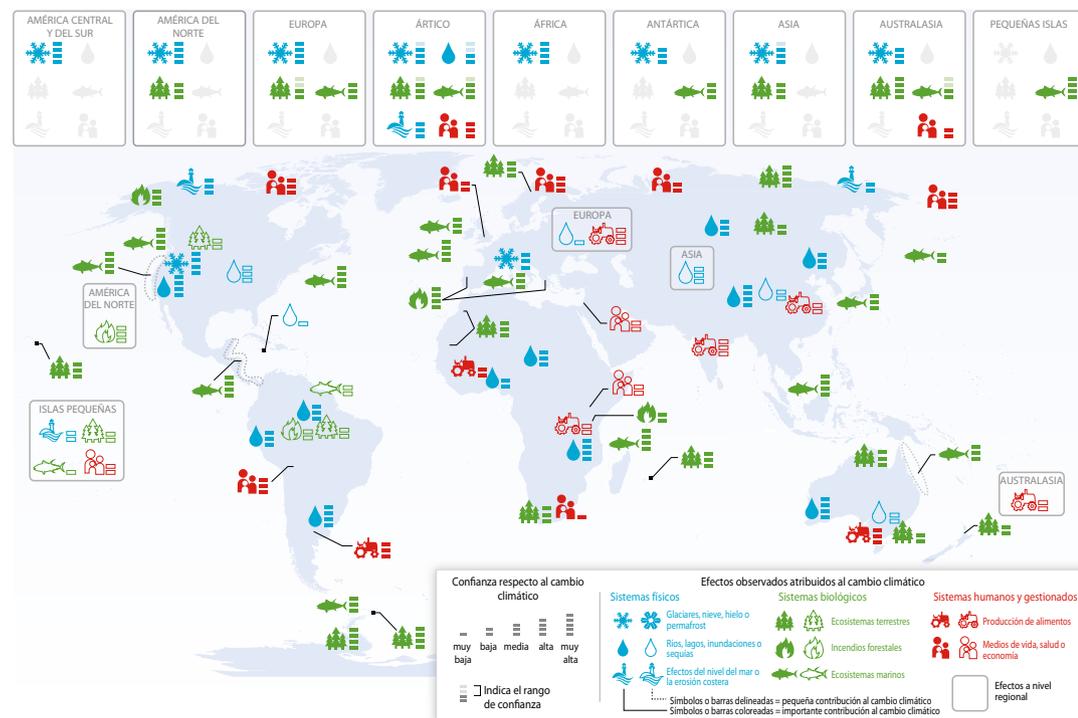
Si bien la adaptación tiene su origen en la biología evolutiva, el uso del término para referirse a las respuestas acertadas del ser humano a los cambios ambientales nace con la gestión de desastres. En ese ámbito, todas las respuestas humanas a un desastre son adaptaciones a una situación que ha cambiado, incluidos los esfuerzos encaminados a mitigar o eliminar el origen del desastre³. La distinción entre mitigación y adaptación se concretó en las negociaciones sobre la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Una de las justificaciones esgrimidas para distinguirlos fue que los negociadores podrían desviar su atención de un posible acuerdo sobre las sendas de mitigación si tenían a su disposición la adaptación como una alternativa más sencilla⁴. Otra explicación fue que los países desarrollados solo apoyarían medidas que propiciaran resultados globales, como la reducción del dióxido de carbono en la atmósfera, en lugar de objetivos de adaptación específicos de una determinada zona⁵.

A medida que las negociaciones sobre el cambio climático avanzaron, los investigadores analizaron cómo y por qué algunas medidas de adaptación dan mal resultado, en especial aquellas que malgastan una cantidad sustancial de recursos humanos, naturales o financieros⁶. Cuando se fundamentaron esas opiniones, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) cayó en la cuenta de la importancia de contar con terminología precisa e inequívoca. En 2001, el Grupo propuso una definición matizada de la adaptación, que se aleja de su uso en la biología o la ciencia del comportamiento: «[...] una adaptación que no logra reducir la vulnerabilidad, sino que la incrementa»⁷. Los debates se centraron posteriormente en las diferencias entre la inadaptación y la adaptación infructuosa. Una adaptación infructuosa puede ser neutra, es decir, referirse a una acción que no dio resultado. Sin embargo, si la tentativa de adaptación agrava la vulnerabilidad de otros grupos o sectores, incluso en el futuro, nos encontramos ante una inadaptación⁸. Al mismo tiempo, ni la adaptación infructuosa ni la inadaptación deberían confundirse con la adaptación simulada —proyectos de gran envergadura que se presentan como adaptación, como infraestructuras de costo elevado que solo sirven

a los intereses de un pequeño grupo, sin mejorar realmente la resiliencia ni reducir la vulnerabilidad al cambio climático—⁹.

La reflexión sobre la inadaptación sigue progresando. Un estudio prestigioso, que abordó el problema desde el punto de vista de los resultados, señala cinco categorías de inadaptación en comparación con otras alternativas. Según este análisis, las inadaptaciones son medidas que incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero, conllevan una carga desproporcionada para los más vulnerables, acarrear grandes costos de oportunidad, reducen los incentivos para la adaptación o establecen sendas que limitan la capacidad de elección de las generaciones futuras⁸. Esos parámetros se definieron con mayor profundidad y ampliaron en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, publicado en 2014¹⁰. A medida que se aclare la distinción entre los conceptos de adaptación e inadaptación y seamos más capaces de diferenciarlos, gestionar las consecuencias del cambio climático debería parecer una tarea menos abrumadora.

Patrones mundiales de los efectos observados del cambio climático



Cada uno de los símbolos resaltados en los paneles superiores indica una clase de sistemas en los que el cambio climático ha desempeñado un papel fundamental en los cambios observados en al menos uno de los sistemas de esa clase en la región correspondiente. Las barras indican el grado de confianza al atribuir esos efectos regionales. Los efectos regionales en los que el cambio climático ha desempeñado un papel menor se muestran en la región correspondiente en un recuadro con símbolos resaltados. Los efectos subregionales se indican sobre el mapa con símbolos situados cerca de la zona aproximada donde se observan. Las zonas afectadas abarcan desde lugares concretos hasta áreas amplias como una cuenca fluvial principal. Los colores sirven para distinguir los efectos físicos (azul), biológicos (verde) y humanos (rojo). La ausencia de determinados efectos del cambio climático en este gráfico no implica que esos efectos no se hayan producido.

Fuente: Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático¹¹

La inadaptación a escala

Ante el cambio climático, el concepto de inadaptación ha evolucionado de una adaptación que no da resultado a medidas adaptativas que dañan los recursos, reducen las opciones disponibles en el futuro, agravan el problema para las poblaciones vulnerables o transmiten la responsabilidad de solucionarlo a las generaciones posteriores. Si una medida de adaptación vulnera los objetivos de desarrollo sostenible, equidad social y erradicación de la pobreza, en especial cuando conlleva una carga desproporcionada para las personas vulnerables, se trata de una inadaptación¹². Entre las iniciativas encaminadas a evitar la inadaptación a mayor escala se encuentra la investigación dirigida a determinar los riesgos principales y las estrategias de adaptación responsables a lo largo de la vida útil de los activos de infraestructura que pueden fundamentar las decisiones y acciones de los planificadores y reguladores, los diseñadores, los constructores, los operadores, los inversores y las aseguradoras¹³. Es probable que los peligros de la inadaptación aumenten paralelamente a la escala de la acción. Recordar las características de la capacidad evolutiva en el ámbito de la biología podría servir como análisis preliminar de las medidas inadaptadas, mientras que priorizar la preservación de esa capacidad quizá ayude a prevenir errores graves.

Limitar las opciones futuras a la escala de construir un rompeolas en una propiedad inmobiliaria quizá sea una inadaptación, ya que causará problemas y limitará las opciones de los vecinos, pero por lo general sus consecuencias se restringirán a las inmediaciones de la propiedad. Por otra parte, si una medida deficiente agrava los problemas originales o limita la futura capacidad de decisión a escala regional o mundial, nos hallamos ante una inadaptación mucho más peligrosa. A mayor escala, este tipo de inadaptaciones no solo restringen la capacidad evolutiva, sino que también amenazan la resiliencia de los ecosistemas, los modos de vida y sociedades enteras. Esa escala de las medidas inadaptadas, en especial de las que aumentan las emisiones de gases de efecto invernadero o exacerban la degradación de los ecosistemas, podría dar pie a reacciones geofísicas que empujen a las funciones del sistema terrestre hacia puntos de inflexión globales. Muchos de esos puntos de inflexión son irreversibles —como la pérdida de permafrost, arrecifes de coral o la selva del Amazonas—, y la irreversibilidad podría situarnos por encima de los umbrales planetarios¹⁴.

En el informe del IPCC sobre los efectos que produciría un calentamiento global de 1,5 °C se establecen varios requisitos para una adaptación eficaz, lo que demuestra la importancia de una planificación e implementación respetuosas con el clima durante



Resumen del concepto de inadaptación en el Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático¹⁰

En el Quinto Informe de Evaluación del IPCC, de 2014, el Grupo de Trabajo II sobre los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático, la inadaptación se define como medidas que pueden agravar el riesgo de resultados climáticos adversos, aumentar la vulnerabilidad al cambio climático o reducir el bienestar presente o futuro. Asimismo, se presenta un cuadro resumen con 12 categorías generales de inadaptación.

Dos de esas categorías describen medidas que ignoran de forma deliberada lo que ya sabemos: no se anticipan al cambio climático previsto ni tienen en cuenta sus consecuencias más amplias. Otras categorías guardan relación con la asunción de vulnerabilidades a largo plazo a cambio de beneficios cortoplacistas, incluido el agotamiento de los recursos que provoca una vulnerabilidad posterior; la postergación en contraposición a la acción irreflexiva; la instalación de infraestructura no perdurable; y el incurrir en riesgos morales, al alentar la asunción de riesgos mediante programas que ofrecen retribuciones.

Otras categorías hacen hincapié en las medidas que promueven a un grupo, por lo general una élite, en detrimento del resto; en ellas se advierte de que perpetuar los privilegios puede dar pie a conflictos, al igual que las actuaciones en las que se ignoran los conocimientos, tradiciones y relaciones locales. No obstante, también se considera inadaptación el aferrarse a respuestas tradicionales inadecuadas.

El Grupo de Trabajo II también advierte contra las medidas que generan dependencias en la trayectoria difíciles de corregir, y contra las medidas —en especial las defensas y soluciones de ingeniería— que imposibilitan enfoques alternativos, como la adaptación basada en los ecosistemas. Por último, la migración puede constituir una adaptación apropiada o una inadaptación (o ambas), en función del contexto y de los resultados.

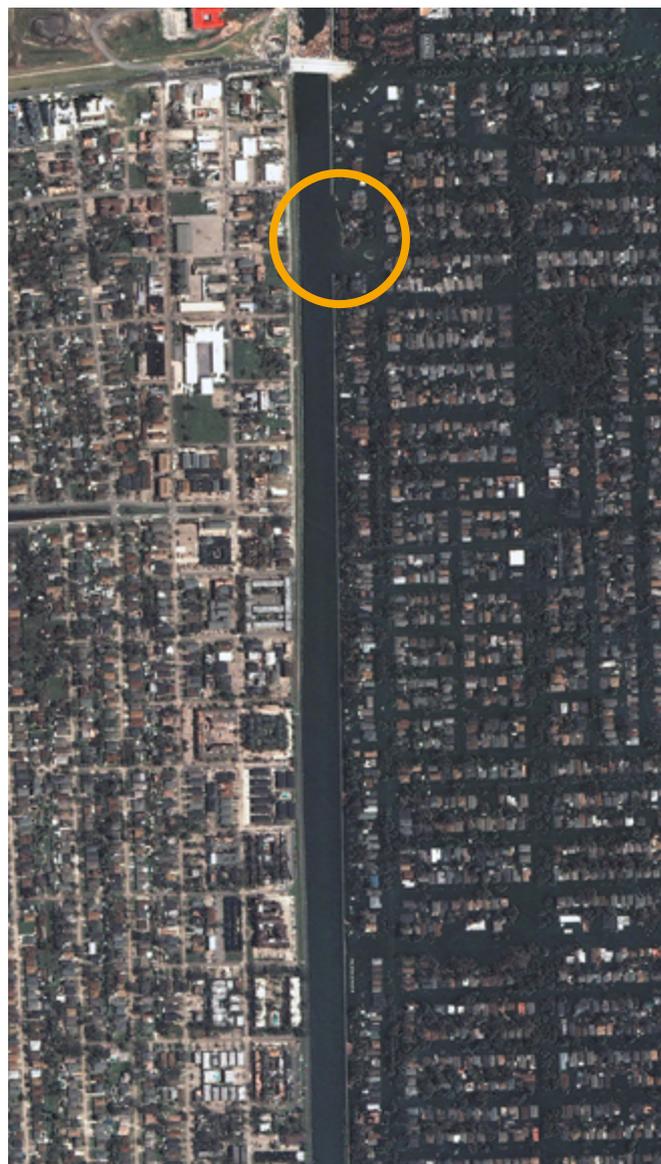
la transición hacia un incremento de temperatura aceptable¹⁵. Evitar la inadaptación representa un elemento fundamental de dicha transición. Varios casos regionales, se identifiquen o no como respuestas al cambio climático, sirven como ejemplo para indagar de manera fructífera sobre un futuro alterado por el cambio climático. Estos casos son muestras breves de las categorías que se presentan en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC y en otras publicaciones actuales.

Equilibrar la demanda a corto plazo con la planificación en aras de la resiliencia a largo plazo

A modo de ejemplo del equilibrio entre los beneficios a más corto y largo plazo cabe mencionar el Proyecto de Infraestructura Costera Resiliente al Clima desarrollado en el sudoeste de Bangladesh, que ya se ha presentado como estudio de caso de una posible inadaptación¹⁶. La cuestión viene determinada por los beneficios de la adaptación durante los dos próximos decenios frente a los costos a más largo plazo de la inadaptación, que serán predominantes en 2050 a medida que la subida del nivel del mar provoque inundaciones en la región¹⁷. Entre los posibles resultados de la inadaptación se encuentran cuestiones complejas relacionadas con la migración tanto dentro como fuera de la región. Los inversores esperan que la creación de nuevos mercados y mejores carreteras, puentes, sistemas de alcantarillado y refugios anticiclones anime a las poblaciones costeras a permanecer en la zona, cuando quizá deberían migrar hacia el interior. Es bastante probable que esos servicios atraigan a otras personas, incluida posiblemente una parte de la población de los asentamientos informales de Daca, que ya se ha tenido que desplazar a causa de desastres naturales¹⁸.

Una carga desproporcionada para las personas vulnerables

En ocasiones, los esfuerzos por adaptarse a condiciones cambiantes en frentes diversos pueden convertirse en inadaptaciones para determinados grupos de población. Después de que en 2005 el huracán Katrina devastara Nueva Orleans y la región circundante, en los Estados Unidos, los planes iniciales para la creación de zonas verdes que aumentarían la resiliencia urbana frente a inundaciones futuras parecían centrar la adquisición de terrenos en las tierras bajas cuya propiedad tradicionalmente había estado en manos de afroamericanos pobres más que de ningún otro grupo^{12,19}. Esa propuesta concreta de renovación urbana no fue aceptada. No obstante, más de diez años después, los estudios demuestran que muchas de las personas más pobres y marginadas de la ciudad jamás recuperaron lo poco que tenían, y que un porcentaje significativo de ellas tuvo que emigrar de la región^{12,20}.



En agosto de 2005, el huracán Katrina causó graves daños en numerosas secciones de un sistema de diques diseñado para proteger la ciudad de Nueva Orleans, de baja altitud, frente a las inundaciones y las marejadas ciclónicas. Como se aprecia en la imagen por satélite, una brecha en un dique permitió que el agua del canal de la calle 17 penetrara en los barrios al este del canal y los anegara, provocando daños materiales valorados en miles de millones de dólares.

Fotografía: Digital Globe (www.digitalglobe.com)

Inadaptación al cambio climático

En los estudios de caso que se presentan en esta infografía se observan un conjunto de medidas para adaptarse a un clima cambiante a escalas diversas. Algunos casos son inadaptados por sus consecuencias imprevistas, o se convertirán en inadaptaciones en un futuro próximo. Otros describen medidas adoptadas tras considerar numerosos factores para evitar la inadaptación.

Tal como la define el IPCC, la inadaptación es una tentativa de adaptación que, sin embargo, agrava el riesgo de daños relacionados con el clima, incrementa la vulnerabilidad al cambio climático o reduce el bienestar presente o futuro.

Las inadaptaciones son malas elecciones entre alternativas, decisiones que incrementan los gases de efecto invernadero, conllevan una carga injusta para los más vulnerables, acarrear costos injustificables, reducen los incentivos para la adaptación o limitan la capacidad de elección de las generaciones venideras.

Decisiones que **ignoran los conocimientos científicos**, las implicaciones más amplias o las consecuencias probables

Medidas que favorecen a un grupo de interés en detrimento del resto y que sientan las bases de **futuros conflictos y perjuicios**

Compensaciones poco prudentes: beneficios a corto frente a largo plazo, riesgos frente a recompensas (riesgo moral), períodos de consideración demasiado cortos o demasiado amplios

Medidas que generan **dependencias en la trayectoria** y bloqueos, o que reducen la capacidad de elección de las generaciones posteriores

Reubicaciones que sitúan a la población en **condiciones todavía más peligrosas**

Sequía

El cambio climático altera el ciclo hidrológico. Las sequías se harán más intensas, frecuentes y persistentes, de modo que pondrán en peligro todos los usos humanos y el funcionamiento ecológico. Las situaciones de sequía prolongada llevan a sobreexplotar las aguas subterráneas, y los acuíferos pocas veces se reabastecen lo suficiente cuando llegan las lluvias.

Para 2025, es probable que el **48% de la superficie terrestre** se haya convertido en zonas áridas

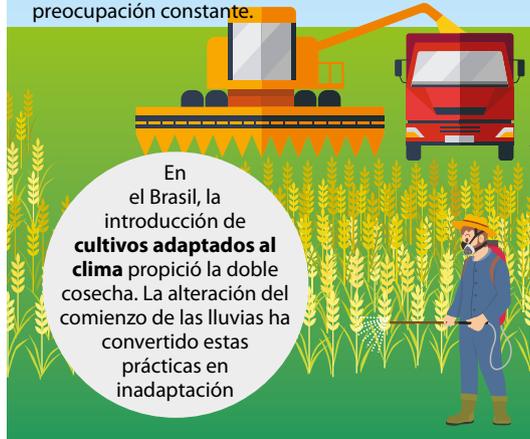
Las sequías recurrentes empujaron al 70% de los ganaderos pobres somalíes a la producción de carbón, con la consiguiente tala de las zonas boscosas, que a su vez aceleró la **desertificación e incrementó la vulnerabilidad**



Agricultura

Los extremos persistentes a causa del cambio climático ponen en peligro los sistemas de producción agrícola. Los agricultores presumen de su capacidad de adaptación, pero estos extremos se dan con tanta frecuencia y con una persistencia tan impredecible que la adaptación es un motivo de preocupación constante.

Algunos agricultores de Zimbabwe contrarrestan la incertidumbre climática incrementando el uso de plaguicidas. Con demasiada frecuencia, estos eliminan también a insectos beneficiosos, lo que empeora la situación



En el Brasil, la introducción de **cultivos adaptados al clima** propició la doble cosecha. La alteración del comienzo de las lluvias ha convertido estas prácticas en inadaptación

Escasez de agua

En 2050, es posible que 5.700 millones de personas vivan en zonas donde el agua sea escasa. Las regiones ya se están adaptando a la escasez de agua por medio de la explotación de las aguas subterráneas, el racionamiento del agua o la desalinización. Tales medidas pueden resultar inadaptaciones a largo plazo.

Ciudad de México sufre escasez de agua. Explotar fuentes distantes de agua subterránea representa una solución a corto plazo. Para adaptarse realmente, invierte en soluciones a largo plazo como la recogida del agua de lluvia y el tratamiento y la reutilización de las aguas residuales grises



Salud

La modificación de las zonas climáticas y la creciente frecuencia e intensidad de los extremos climáticos tienen consecuencias en la salud. Esa variabilidad hace que se pierdan cosechas y amplía el alcance geográfico de vectores de enfermedades que ponen en peligro a especies esenciales, así como a poblaciones humanas.

Se hace un uso excesivo e inadecuado de los antibióticos para prevenir y tratar los problemas veterinarios. Esta inadaptación a las **enfermedades transmitidas por vectores** exacerba el peligro de la resistencia a los antibióticos

Un estudio demostró que el estiércol del ganado tratado con antibióticos **emite más metano** que el que no contiene antibióticos. Los residuos de los antibióticos también alteran los microbios intestinales del escarabajo pelotero



Elevación del nivel del mar

El nivel del mar sigue subiendo en todo el mundo y pone en peligro la infraestructura, los recursos de aguas subterráneas, las islas que constituyen barreras naturales y las comunidades costeras. La amenaza a la existencia de las naciones de poca altitud y los pequeños estados insulares se cierne ahora sobre el modo de vida de millones de personas.

En la legislación estatal se garantiza el acceso de los nativos de Hawai a las zonas costeras con fines culturales y de pesca de subsistencia. La elevación del nivel del mar restringe el acceso público, lo que afecta de manera desproporcionada a los pobres, mientras persiste el desarrollo para el lucro privado

Los niveles de los canales de agua de Florida sirven para mantener la presión que evita la **intrusión del agua salada** en las aguas subterráneas. La elevación del nivel del mar obliga a mantener niveles de agua más altos, con lo que se agrava la amenaza de inundación

Inundaciones

Las inundaciones son uno de los efectos del cambio climático que se padecen con más frecuencia en todo el mundo. Los antiguos sistemas de control de las inundaciones y el agua ya no bastan. A medida que el clima sigue cambiando, para evitar la inadaptación se requiere una gestión adaptativa y un respaldo amplio de las partes interesadas.

La región metropolitana de Bangkok es propensa a las inundaciones debido a la falta de planificación e inversiones. La **«adaptación autónoma»**, carente de planificación y coordinación, provoca inundaciones de baja y debilita todo el sistema de alcantarillado público. En 2011, las respuestas oficiales a las inundaciones protegieron a las personas acomodadas en detrimento de los grupos vulnerables

Incendios forestales

A nivel global, la duración de la temporada de incendios aumentó un 19% entre 1979 y 2013. Los incendios forestales desempeñan un papel importante en los ecosistemas mundiales, pero la devastación que provocan puede arruinar los sistemas socioeconómicos. En algunas regiones, las estrategias de gestión estándar agravan la situación.

Después de decenios de extinción de incendios y cinco años de sequía, los bosques de California están repletos de **material combustible**. Con miras a cambiar la situación, el estado está empezando a ordenar quemas para controlar esa amenaza

Ciudades

Para 2050, el 70% de la población mundial vivirá en las ciudades. En todo el mundo, las ciudades ya padecen los efectos del cambio climático en forma de olas de calor, inundaciones e incapacidad de adaptación. Las adaptaciones urbanas adoptan la forma de políticas, desarrollo de infraestructura o adaptaciones tecnológicas. Pocas veces las soluciones benefician a todos, y en ocasiones amenazan a determinados grupos marginados.

La subida de las temperaturas y la escasez de agua impulsaron a Melbourne (Australia) a fomentar el aire acondicionado y la desalinización. Se trata de inadaptaciones: al incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero, agravan la vulnerabilidad de otros sistemas, sectores y comunidades



Vulnerabilidad social

En todo el mundo, la población se ha adaptado a los efectos del clima de distintas maneras: replanteamiento del abastecimiento de agua, planes de seguros, modificación de la estrategia de subsistencia, migración voluntaria o forzada y proyectos de reasentamiento. Cuando esos métodos bienintencionados no son adecuados para las condiciones locales, o no consideran las múltiples facetas de una cuestión, es posible que la vulnerabilidad aumente.

Los proyectos de reasentamiento de China para la adaptación al clima ofrecían incentivos financieros y mejores condiciones de vida. También generaron **cargas desproporcionadas** para quienes se quedaron atrás, los que ya estaban desplazados y los pobres



Algunos agricultores intentan protegerse de los extremos climáticos **asegurando las cosechas**, lo que puede impedir que adopten otras estrategias de adaptación

Las **pólizas de seguros** son inadaptaciones cuando fomentan conductas de riesgo como la reconstrucción en lugares peligrosos, o favorecen el reemplazo en lugar del rediseño acorde con las condiciones cambiantes. Frente a la intensificación de las amenazas climáticas, los seguros pueden transmitir una **falsa sensación de seguridad**

En los pequeños estados insulares, las mareas cada vez más altas superan las costas y estropean los recursos de agua dulce y las cosechas. Los investigadores señalan que la **movilidad laboral** es la mejor solución a largo plazo para evitar la inadaptación asociada a los reasentamientos



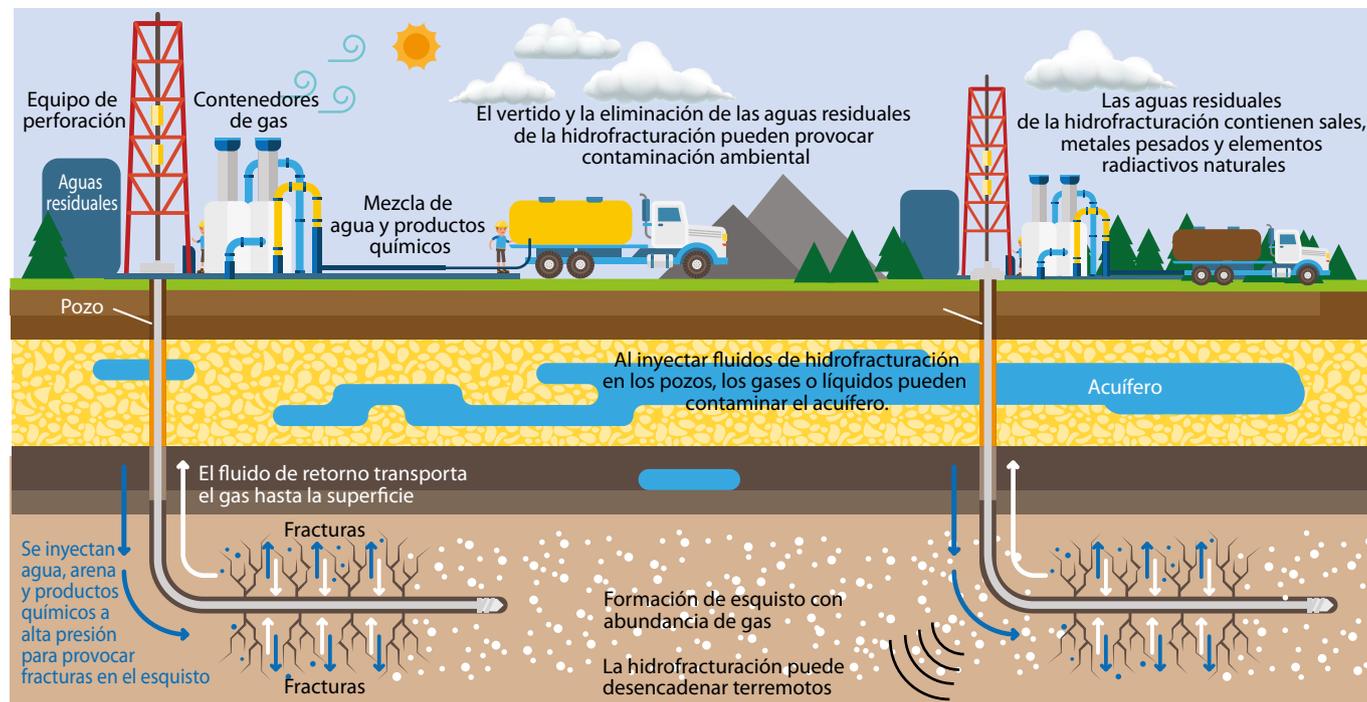
Limitar las opciones de actuación en el futuro

Los geólogos e ingenieros del petróleo adquirieron la capacidad para extraer petróleo y gas de depósitos a gran profundidad sellados por las formaciones de roca²¹. Algunos de los depósitos agotados se consideran adecuados para secuestrar el dióxido de carbono durante siglos²² debido a nuestra comprensión de la permeabilidad de los depósitos y a la calidad de la capa de roca que los sella^{21,23}. Cuando se promovió el gas natural como estrategia de mitigación, es decir, como combustible de transición entre el carbón y el petróleo y las energías renovables, aumentaron las inversiones y la tecnología evolucionó²⁴. Sin embargo, esa solución plantea más problemas de los que se habían previsto. Muchos de ellos guardan relación con la evolución de una técnica de extracción denominada «fracturación hidráulica» o «hidrofracturación»^{25,26}. Esta tecnología inyecta una mezcla de agua, arena y productos químicos a alta presión para crear fisuras y grietas en los depósitos con el propósito de liberar el gas natural. La hidrofracturación conlleva varios problemas ambientales, tales como el agotamiento de los acuíferos y su contaminación por los productos químicos que se utilizan en la perforación y

la inyección; las fugas de metano en el medio ambiente; y el incremento de la sismicidad²⁷⁻³⁰. Asimismo, hay quien plantea que la fracturación hidráulica podría destruir el sello de roca gracias al cual los depósitos agotados resultan valiosos para el secuestro de carbono^{31,32}.

El informe del IPCC sobre los efectos del calentamiento global de 1,5 °C describe pormenorizadamente dos trayectorias de reducción de las emisiones y limitación de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera que permitirían contener el incremento de la temperatura mundial con respecto a los niveles preindustriales por debajo de 1,5 °C. Ambas trayectorias dependen en gran medida de la promesa de secuestrar el carbono de las formaciones geológicas¹⁵. La política industrial de la fracturación hidráulica representa una inadaptación desde dos puntos de vista: La posibilidad de renunciar a beneficios a largo plazo en aras de otros a corto plazo que acarreen dependencias en la trayectoria al dañar recursos futuros. Al mismo tiempo, la hidrofracturación exagera las emisiones de gases de efecto invernadero a causa de las fugas de metano que tienen lugar en su ciclo de producción.

Fractura hidráulica o hidrofracturación





Yacimiento de gas de Jonah, Wyoming (Estados Unidos)

Fotografía: EcoFlight

Evitar la inadaptación en un futuro limitado por los 1,5 °C

De la visión planteada en el informe del IPCC sobre los efectos del calentamiento global de 1,5 °C, y de la prudencia de mantener el incremento de la temperatura por debajo de ese límite, se deduce que es necesario considerar las consecuencias del cambio climático de manera más amplia en las decisiones de los sectores público y privado, así como de la sociedad civil¹⁵. En lugar de restringir el concepto de la inadaptación a los resultados desafortunados y complicaciones de medidas que formalmente se definen como adaptación, los asesores en materia de políticas y los responsables de las decisiones en distintos niveles y en un conjunto amplio de instituciones podrían extender sus deliberaciones para evitar inadaptaciones al cambio climático en su planificación.

En el informe del IPCC también se destaca la Agenda 2030 de las Naciones Unidas y sus objetivos de desarrollo sostenible, en especial los referidos a la igualdad y la equidad¹⁵. El ideal encaminado a superar los retos climáticos que se plantean se centra en un futuro que merezca la pena vivir y mejor que el presente de demasiadas personas. Reducir las causas principales de los conflictos, las guerras, las inseguridades, la pobreza y las migraciones es un elemento fundamental de ese ideal. La especie humana siempre ha sabido adaptarse a nuevas situaciones, y somos por naturaleza criaturas adaptables. El aprendizaje a base

de ensayo y error constituye una metodología fiable que orienta nuestras adaptaciones, pero nuestra especie también se sirve de la previsión y planifica con anticipación. Podemos diseñar nuestro futuro. Para evitar las inadaptaciones no solo debemos aprender de nuestros errores, sino también de los que cometen particulares y comunidades de todo el mundo. La previsión no se circunscribe a las sospechas, suposiciones o incluso aspiraciones de un grupo, sino que debe sustentarse en pruebas científicas y probabilidades realistas.

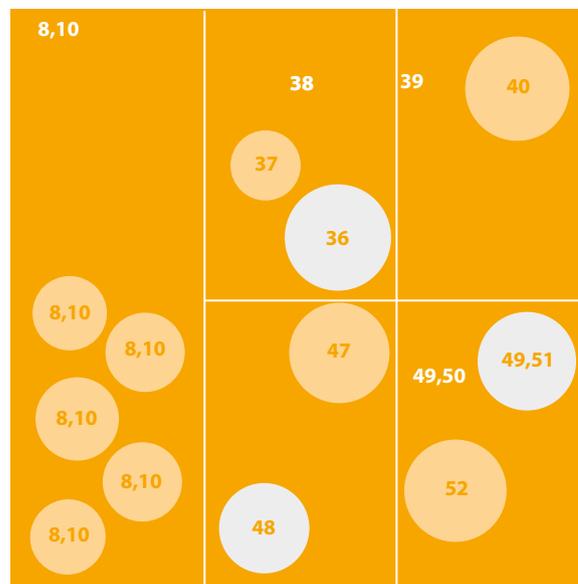
Las pruebas indican que la inadaptación puede evitarse evaluando todos los costos y beneficios, incluidos los secundarios, para todos los grupos, y señalando con claridad quién saldrá ganando y perdiendo, y cuál es el mejor modo de compartir las cargas. La costumbre arraigada de desestimar los intereses de las generaciones futuras no resulta apropiada en ninguna de las trayectorias del IPCC que contendrán el incremento medio de las temperaturas en la franja razonable de los 1,5 °C. Hoy vivimos en ese futuro que se descartó indebidamente cuando en 1992 se acordó la Convención Marco sobre el Cambio Climático. Para evitar la inadaptación hay que eludir bloqueos y dependencias en la trayectoria, y en su lugar optimizar la capacidad evolutiva. De lo contrario, en términos biológicos, nos encontraremos en un callejón sin salida.

Bibliografía

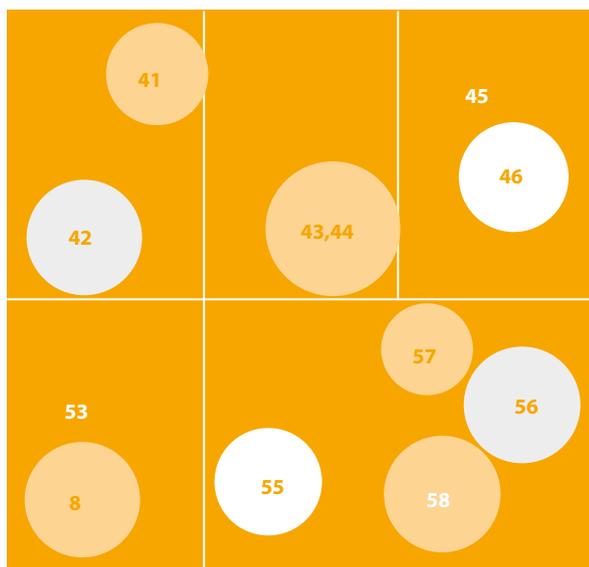
1. Darwin, C.R. (1859). *On the origin of the species by means of natural selection*. London: John Murray.
2. Martínez-Padilla, J., Estrada, A., Early, R. and García-González, F. (2017). Evolvability meets biogeography: evolutionary potential decreases at high and low environmental favourability. *Proceedings of the Royal Society B*, 284(1856), 20170516. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0516>
3. Burton, I., Kates, R.W. and White, G.F. (1993). *The environment as hazard*. New York: Guilford Press.
4. Greenhill, B., Dolšák, N. and Prakash, A. (2018). Exploring the adaptation-mitigation relationship: Does information on the costs of adapting to climate change influence support for mitigation? *Environmental Communication*, 12(7), 911-927. <https://doi.org/10.1080/10.1080/17524032.2018.1508046>
5. Bodansky, D. (1993). The United Nations Framework Convention on Climate Change: A commentary. *Yale Journal of International Law*, 18, 451. <https://digitalcommons.law.yale.edu/yjil/vol18/iss2/>
6. Burton, I. and van Aalst, M.K. (1999). Come hell or high water: integrating climate change vulnerability and adaptation into Bank work. Environment Department working paper No. 72, Climate change series. Washington DC: World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/212171468756566936/pdf/multi-page.pdf>
7. McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S. (eds.). (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press
8. Barnett, J., and O'Neill, S. (2010). Maladaptation. *Global Environmental Change*, 2(20), 211-213. <https://www.sciencedirect.com/journal/global-environmental-change/vol/20/issue/2>
9. Dolšák, N. and Prakash, A. (2018). The politics of climate change adaptation. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 317-341. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025739>
10. Noble, I.R., Huq, S., Anokhin, Y.A., Carmin, J., Goudou, D., Lansigan, F.P. et al. (2014). Adaptation needs and options. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E. et al. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 833-868. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap14_FINAL.pdf
11. Cramer, W., Yohe, G.W., Auffhammer, M., Huggel, C., Molau, U., da Silva Dias, M.A.F. et al. (2014) Detection and attribution of observed impacts. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E. et al. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press. 979-1037. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
12. Anguelovski, I., Shi, L., Chu, E., Gallagher, D., Goh, K., Lamb, Z. et al. (2016). Equity impacts of urban land use planning for climate adaptation: critical perspectives from the global north and south. *Journal of Planning Education and Research*, 36(3), 333-348. <https://doi.org/10.1177%2F0739456X16645166>
13. Hayes, S. (2019). Adapting infrastructure to climate change: who bears the risk and responsibility? In *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies*. Mathew, J., Lim, C.W., Ma, L., Sands, D., Cholette, M.E. and Borghesani, P. (eds.). Proceedings of the 12th World Congress on Engineering Asset Management and the 13th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery. Switzerland: Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95711-1_24
14. Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T.M., Folke, C., Liverman, D. et al. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252-8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>
15. Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R. et al. (eds.). Switzerland: IPCC. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
16. Magnan, A.K., Schipper, E.L.F., Burkett, M., Bharwani, S., Burton, I., Eriksen, S. et al. (2016). Addressing the risk of maladaptation to climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(5), 646-665. <https://doi.org/10.1002/wcc.409>
17. Asian Development Bank (2018). *Bangladesh: Coastal Climate-Resilient Infrastructure Project*. Sovereign (Public) Project 45084-002. <https://www.adb.org/projects/45084-002/main>
18. International Organization for Migration (2009). Climate Change and Displacement in Bangladesh - A Silent Crisis? <https://www.iom.int/migrant-stories/climate-change-and-displacement-bangladesh-silent-crisis>
19. Kates, R.W., Colten, C.E., Laska, S., and Leatherman, S.P. (2006). Reconstruction of New Orleans after Hurricane Katrina: a research perspective. *Proceedings of the National Academy of Science*, 103(40), 14653-14660. <https://doi.org/10.1073/pnas.0605726103>
20. Bleemer, Z. and van der Klaauw, W. (2017). Disaster (over-)insurance: the long-term financial and socioeconomic consequences of Hurricane Katrina. Staff Report, No. 807. New York, NY: Federal Reserve Bank of New York. https://www.newyorkfed.org/research/staff_reports/sr807
21. Orr Jr, F.M. (2003). Sequestration via injection of carbon dioxide into the deep earth. In *The Carbon Dioxide Dilemma: Promising Technologies and Policies*. National Academy of Engineering and National Research Council. Washington, DC: The National Academies Press. <https://www.nap.edu/read/10798/chapter/3#17>
22. Benson, S. M. and Orr, F. M. (2008). Carbon dioxide capture and storage. *MRS bulletin*, 33(4), 303-305. <https://doi.org/10.1557/mrs2008.63>
23. Huppert, H.E. and Neufeld, J.A. (2014). The fluid mechanics of carbon dioxide sequestration. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46, 255-272. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-011212-140627>

24. Weissman, S. (2016). Natural Gas as a Bridge Fuel – Measuring the Bridge. Center for Sustainable Energy, San Diego. http://energycenter.org/sites/default/files/docs/nav/policy/research-and-reports/Natural_Gas_Bridge_Fuel.pdf
25. Howarth, R.W., Santoro, R., and Ingraffea, A. (2011). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. *Climatic Change*, 106(4), 679. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0061-5>
26. United Nations Conference on Trade and Development (2018). Commodities at a glance. *Special Issue on Shale Gas 9*. New York and Geneva: UNCTAD. https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2017d10_en.pdf
27. Chen, H. and Carter, K.E. (2016). Water usage for natural gas production through hydraulic fracturing in the United States from 2008 to 2014. *Journal of Environmental Management*, 170, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.023>
28. U.S. EPA. (2016). Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States. United States Environmental Protection Agency/Office of Research and Development, Washington, DC. EPA/600/R-16/236Fa. <https://cfpub.epa.gov/ncea/hfstudy/recordisplay.cfm?deid=332990>
29. Drollette, B.D., Hoelzer, K., Warner, N.R., Darrah, T.H., Karatum, O., O'Connor, M.P., Nelson, R.K. et al. (2015). Elevated levels of diesel range organic compounds in groundwater near Marcellus gas operations are derived from surface activities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 112(43), 13184-13189. <https://doi.org/10.1073/pnas.1511474112>
30. Skoumal, R.J., Brudzinski, M.R. and Currie, B.S. (2015). Earthquakes Induced by Hydraulic Fracturing in Poland Township, Ohio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 189-197. <https://doi.org/10.1785/0120140168>
31. Elliot, T.R. and Celia, M.A. (2012). Potential restrictions for CO2 sequestration sites due to shale and tight gas production. *Environmental Science & Technology*, 46(7), 4223-4227. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es2040015>
32. Moriarty, P. and Honnery, D. (2018). Energy policy and economics under climate change. *AIMS Energy*, 6(2): 272-290. <https://doi.org/10.3934/energy.2018.2.272>
33. Jackson, R.B., Vengosh, A., Darrah, T.H., Warner, N.R., Down, A., Poreda, R.J., Osborn, S.G., Zhao, K. and Karr, J.D. (2013). Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(28), 11250-11255. <https://doi.org/10.1073/pnas.1221635110>
34. Omara, M., Sullivan, M.R., Li, X., Subramanian, R., Robinson, A.L. and Presto, A.A. (2016). Methane Emissions from Conventional and Unconventional Natural Gas Production Sites in the Marcellus Shale Basin. *Environmental Science & Technology*, 50, 2099-2107. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05503>
35. Osborn, S.G., Vengosh, A., Warner, N.R. and Jackson, R.B. (2011). Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8172-8176. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100682108>

Referencias gráficas

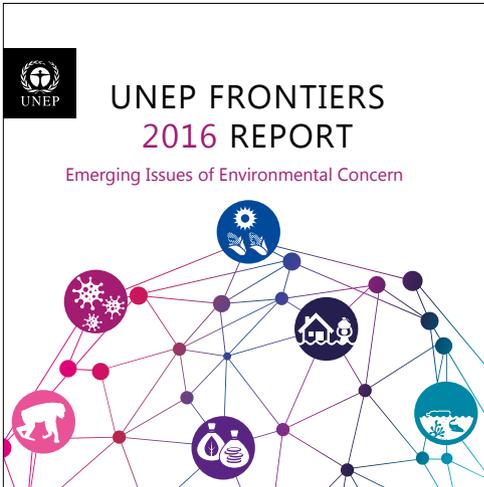


36. Hartmann, I., Sugulle, A.J. and Awale, A.I. (2010). The Impact of Climate Change on Pastoralism in Salahley and Bali-gubadle Districts, Somaliland. Heinrich Böll Stift ung, East and Horn of Africa, Nairobi. https://ke.boell.org/sites/default/files/the_impact_of_climate_change_on_pastoralism_in_salahley_and_bali-gubadle_districts_-_somaliland.pdf
37. Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G. and Guo, R. (2015). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6, pages 166-171. <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
38. IPCC (2013). Summary for Policymakers. 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 [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
39. WWAP (2018). The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>
40. Tellman, B., Bausch, J.C., Eakin, H., Anderies, J.M., Mazari-Hiriart, M., Manuel-Navarrete, D. and Redman, C.L. (2018). Adaptive pathways and coupled infrastructure: seven centuries of adaptation to water risk and the production of vulnerability in Mexico City. *Ecology and Society*, 23(1):1. <https://doi.org/10.5751/ES-09712-230101>



41. Czajkowski, J., Engel, V., Martinez, C., Mirchi, A., Watkins, D., Hughes, J., Sukop, M. (2015). Economic impacts of urban flooding in south Florida: Potential consequences of managing groundwater to prevent salt water intrusion. Working paper no. 2015-10, Risk Management and Decision Processes Center, University of Pennsylvania. http://opim.wharton.upenn.edu/risk/library/WP201510_GWLevelsFloodClaims_Czajkowski-et-al.pdf
42. Finkbeiner, E.M., Micheli, F., Bennett, N.J., Ayers, A.L., Le Cornu, E. and Doerr, A.N. (2017). Exploring trade-offs in climate change response in the context of Pacific Island fisheries. *Marine Policy*, 88, 359-364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpol.2017.09.032>
43. Limthongsakul, S., Nitivattananon, V. and Arifwidodo, S.D. (2017). Localized flooding and autonomous adaptation in peri-urban Bangkok. *Environment and Urbanization*, 29(1), 51-68. <https://doi.org/10.1177/0956247816683854>
44. Marks, D. (2015). The Urban Political Ecology of the 2011 Floods in Bangkok: The Creation of Uneven Vulnerabilities. *Pacific Affairs*, 88(3), 623-651. <http://dx.doi.org/10.5509/2015883623>
45. Jolly, W.M., Cochrane, M.A., Freeborn, P.H., Holden, Z.A., Brown, T.J., Williamson, G.J. and Bowman, D.M. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6:7537. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
46. Little, J. B. (2018) Fighting Fire with Fire: California Turns to Prescribed Burning. Yale Environment 360. Yale School of Forestry & Environmental Studies. <https://e360.yale.edu/features/fighting-fire-with-fire-california-turns-to-prescribed-burning>
47. Zinyemba, C., Archer, E. and Rother, H-A. (2018). Climate variability, perceptions and political ecology: Factors influencing changes in pesticide use over 30 years by Zimbabwean smallholder cotton producers. *PLoS ONE*, 13(5): e0196901. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196901>
48. Pires, G.F., Abrahão, G.M., Brumatti, L.M., Oliveira, L.J.C., Costa, M.H., Liddicoat, S. and Ladle, R.J. (2016). Increased climate risk in Brazilian double cropping agriculture systems: Implications for land use in Northern Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228: 286-298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.07.005>
49. Bett, B., Kiunga, P., Gachohi, J., Sindato, C., Mbotha, D., Robinson, T., Lindahl, J. and Grace, D. (2017). Effects of climate change on the occurrence and distribution of livestock diseases. *Preventive Veterinary Medicine*, 137, Part B, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.11.019>
50. UNEP (2016). UNEP Frontiers 2016 Report: Emerging Issues of Environmental Concern. United Nations Environment Programme, Nairobi. www.unenvironment.org/frontiers
51. UNEP (2017). Frontiers 2017: Emerging Issues of Environmental Concern. United Nations Environment Programme, Nairobi. <http://www.unenvironment.org/frontiers>
52. Hammer, T.J., Fierer, N., Hardwick, B., Simojoki, A., Slade, E., Taponen, J., Viljanen, H. and Roslin, T. (2016). Treating cattle with antibiotics affects greenhouse gas emissions, and microbiota in dung and dung beetles. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283:20160150. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.0150>
53. UN (2014). World Urbanisation Prospects: the 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352). Department of Economic and Social Affairs. Population Division, New York: United Nations.
54. Ford, J.D., Labbé, J., Flynn, M., Araos, M. and IHACC Research Team (2017). Readiness for climate change adaptation in the Arctic: a case study from Nunavut, Canada. *Climatic Change*, 145(1-2), 85-100. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2071-4>
55. Lei, Y., Finlayson, C.M., Thwaites, R., Shi, G. and Cui, L. (2017). Using Government Resettlement Projects as a Sustainable Adaptation Strategy for Climate Change. *Sustainability*, 9, 1373. <https://doi.org/10.3390/su9081373>
56. O'Hare, P., White, I. and Connelly, A. (2016). Insurance as maladaptation: Resilience and the 'business as usual' paradox. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 34(6), 1175-1193. <https://doi.org/10.1177/0263774X15602022>
57. Bryant, C.R., Bousbaine, A.D., Akkari, C., Daouda, O., Delusca, K., Épule, T.E. and Drouin-Lavigne, C. (2016). The roles of governments and other actors in adaptation to climate change and variability: The examples of agriculture and coastal communities. *AIMS Environmental Science*, 3(3), 326-346. <https://doi.org/10.3934/environsci.2016.3.326>
58. ILO (2016). Labour Mobility and Regional Climate Adaptation. International Labour Organization Technical Note https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---migrant/documents/publication/wcms_534341.pdf





En 2016, el PNUMA presentó una nueva serie anual de publicaciones: *Fronteras. Nuevos temas de interés ambiental*. El informe identifica y permite conocer un amplio conjunto de temas novedosos relacionados con el medio ambiente que precisan la atención y la adopción de medidas por parte de los Gobiernos, las partes interesadas, los encargados de adoptar decisiones y la ciudadanía en general. La primera edición (en inglés), *Fronteras 2016*, presenta los seis temas siguientes:

- El sector financiero: pieza esencial para impulsar el desarrollo sostenible
- La zoonosis: las líneas poco definidas entre las nuevas enfermedades y la salud de los ecosistemas
- Microplásticos: problemas en la cadena alimentaria
- Daños y perjuicios: consecuencias inevitables del cambio climático en los ecosistemas
- Un cáliz envenenado: la acumulación de toxinas en los cultivos en la era del cambio climático
- Consumismo exótico: el comercio ilegal de animales vivos



En el informe Fronteras 2017 se tratan estos nuevos temas.

- Resistencia a los antimicrobianos: investigar la dimensión ambiental
- Nanomateriales: aplicar el principio de precaución
- Zonas marinas protegidas: un elemento fundamental para el desarrollo sostenible
- Tormentas de arena y polvo: contener un fenómeno mundial
- Soluciones solares: reducir la disparidad energética de los asentamientos sin conexión a la red
- Desplazamiento ambiental: movilidad humana en el Antropoceno

unenvironment.org/frontiers



**Programa de las Naciones
Unidas para el Medio Ambiente**

United Nations Avenue, Gigiri
P O Box 30552, 00100 Nairobi, Kenya
Tel +254 20 7621234 | publications@unenvironment.org
www.unenvironment.org

