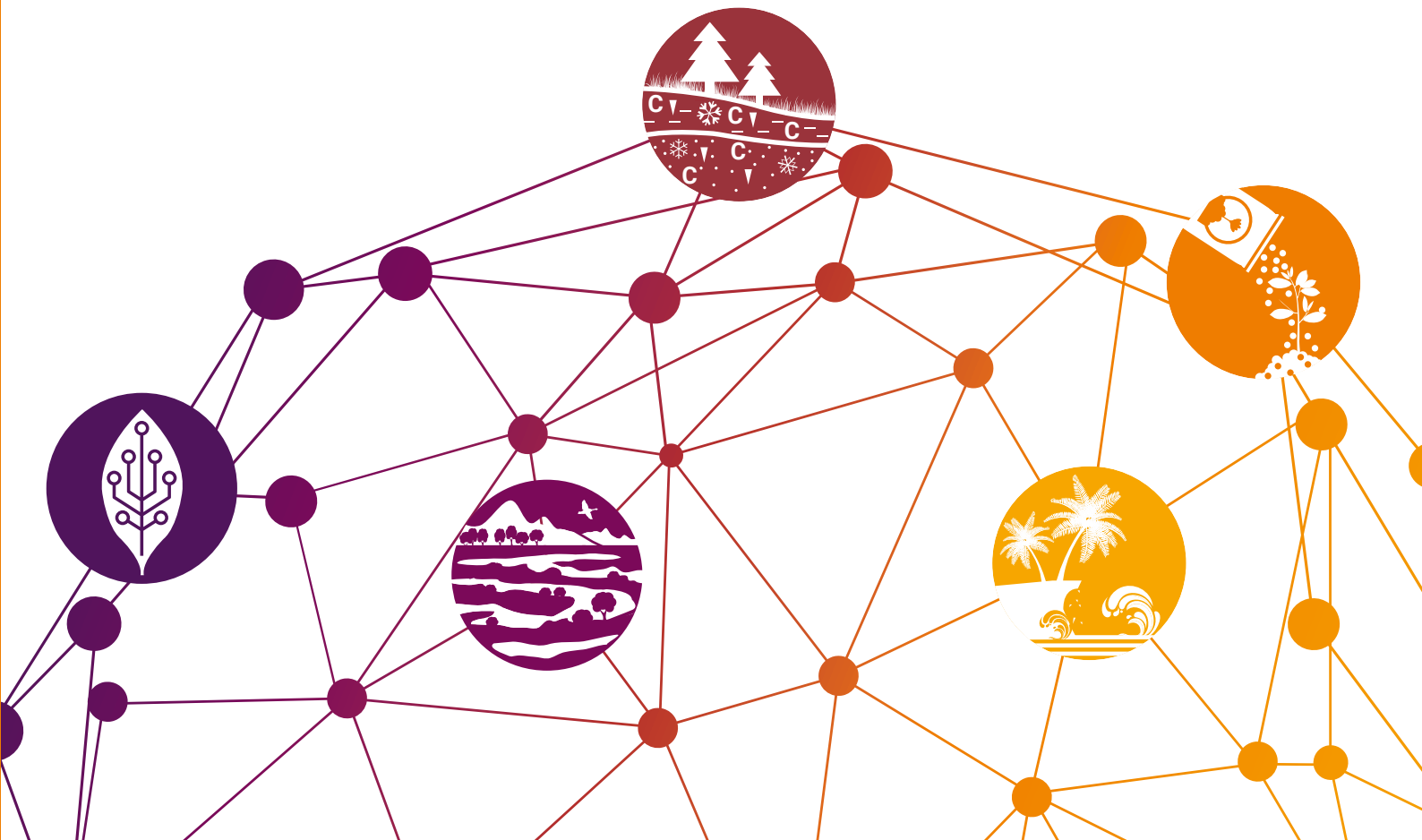


# FRONTERAS 2018/19

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.

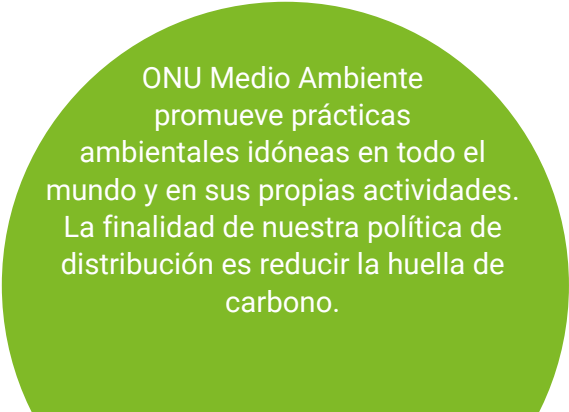
© Mapas, fotografías e ilustraciones según se especifica.

### **Referencia bibliográfica recomendada**

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

### **Producción**

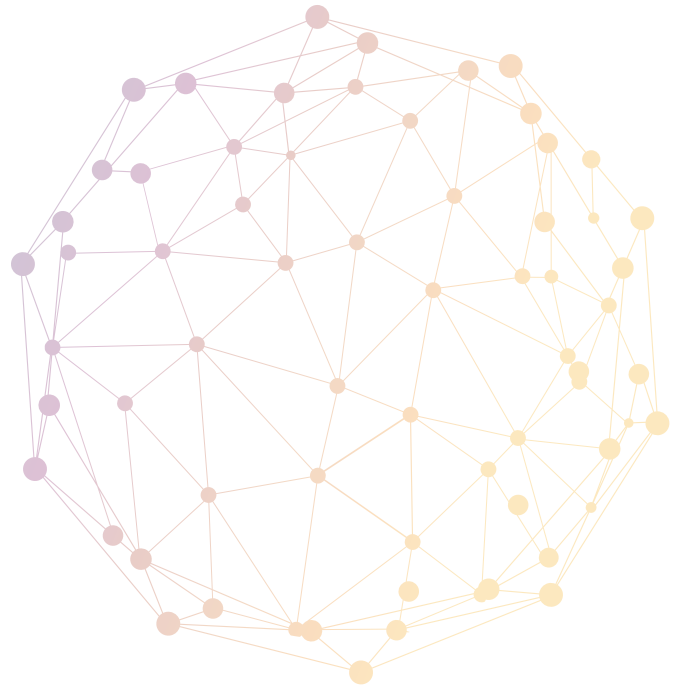
División de Ciencias  
ONU Medio Ambiente  
P. O. Box 30552  
Nairobi, 00100, Kenya  
Tel.: (+254) 20 7621234  
Correo electrónico: [publications@unenvironment.org](mailto:publications@unenvironment.org)  
Sitio web: [www.unenvironment.org/es](http://www.unenvironment.org/es)



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
	<b>Biología sintética: rediseñar el medio ambiente</b>	<b>10</b>
	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
	<b>Conectividad ecológica: un puente para preservar la biodiversidad</b>	<b>24</b>
	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
	<b>Turberas del permafrost: pérdida de terreno en un mundo cada vez más cálido</b>	<b>38</b>
	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
	<b>La fijación de nitrógeno: de la contaminación por el ciclo del nitrógeno a la economía circular del nitrógeno</b>	<b>52</b>
	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
	<b>Inadaptación al cambio climático: evitar las trampas de la senda evolutiva</b>	<b>66</b>
	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**

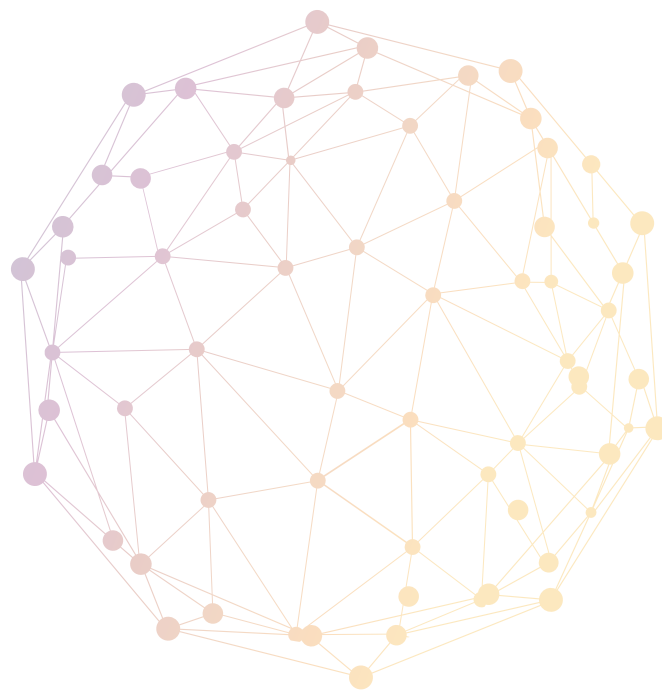
Redactora jefa: Pinya Sarasas, ONU Medio Ambiente  
Asistencia técnica: Allan Lelei, ONU Medio Ambiente  
Correctora: Alexandra Horton, Reino Unido

### **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





*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 mundo<sup>1</sup>. 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 permanentemente<sup>2-5</sup>.

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 km<sup>2</sup>, y la turba de menor grosor se extiende por un área todavía mayor<sup>3,6-8</sup>. 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<sup>9,10</sup>.

Las turberas del permafrost están cambiando con rapidez. Hoy el Ártico se calienta a un ritmo que duplica el promedio mundial<sup>11</sup>. 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 notablemente<sup>12-15</sup>. La degradación del permafrost conlleva el riesgo de que la movilización y

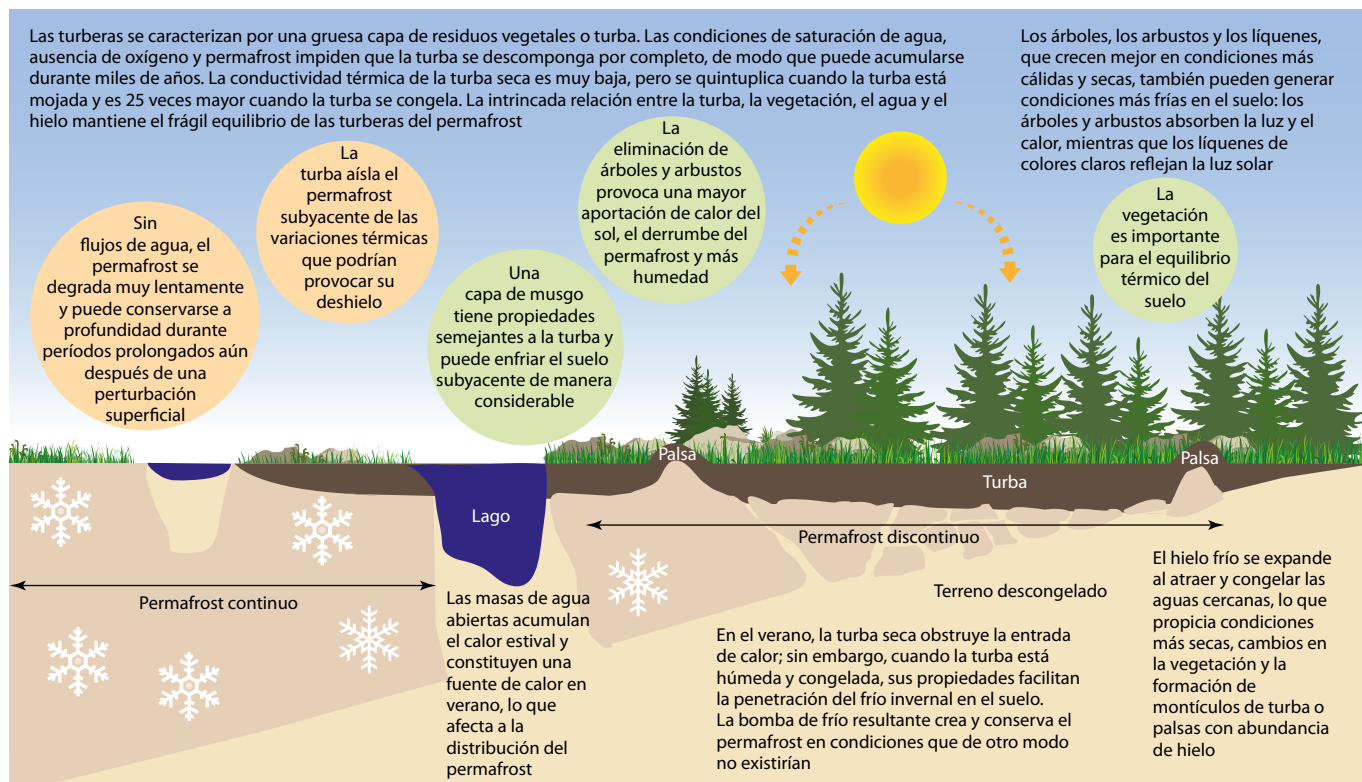
descomposición microbiana de materia orgánica que antes estaba enterrada y congelada podría provocar la liberación de una cantidad significativa de dióxido de carbono y metano, lo que a su vez exacerbaría en gran medida el calentamiento global<sup>16-19</sup>. La degradación generalizada del permafrost 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 humanas<sup>20</sup>. 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 compleja<sup>20-22</sup>. 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 emisiones<sup>23-25</sup>. Además, las turberas congeladas y desheladas también podrían alternarse con rapidez en el tiempo y el espacio<sup>23,26</sup>.

El deshielo del permafrost se considera uno de los puntos de inflexión que podría precipitar un efecto invernadero incontenible, o una «Tierra invernadero» incontrolable<sup>27</sup>. 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 *xx*<sup>15</sup>. 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<sup>15,28</sup>.

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 discontinuo<sup>29-31</sup>. No obstante, las observaciones a largo plazo en todo el Ártico no revelan patrones uniformes en el desarrollo de termokarst atribuibles al calentamiento global<sup>15</sup>.

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 profundidad<sup>19</sup>. La proliferación de estos lagos, por otra

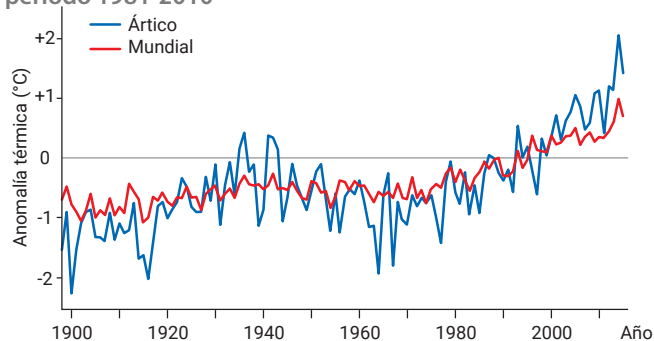
▶ **Vídeo: ¿Qué es el permafrost?**



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 Unidos<sup>1</sup>

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 permafrost<sup>32-37</sup>. 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 termokarst<sup>38-44</sup>. 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 permafrost<sup>31</sup>, 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<sup>45,46</sup>.

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<sup>47,48</sup>. Sin embargo, en la mayoría de los modelos no se representan de forma adecuada los procesos de deshielo<sup>8</sup>.





## 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<sup>56,57</sup>. El termokarst tiene una presencia generalizada en las zonas con permafrost discontinuo<sup>58,59</sup>. También se halla con frecuencia en las zonas mucho más frías de permafrost continuo, donde las brechas del hielo desestabilizan el permafrost<sup>60,61</sup>.

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<sup>22,23,62</sup>. 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 ( $\text{CH}_4$ ) 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 permafrost<sup>49</sup>.

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<sup>50,51</sup>. 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<sup>14,52</sup>. 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 termokarst<sup>53</sup>. 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<sup>54,55</sup>. 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 pesca<sup>14</sup>.



Deshielo y hundimiento del permafrost en Mongolia

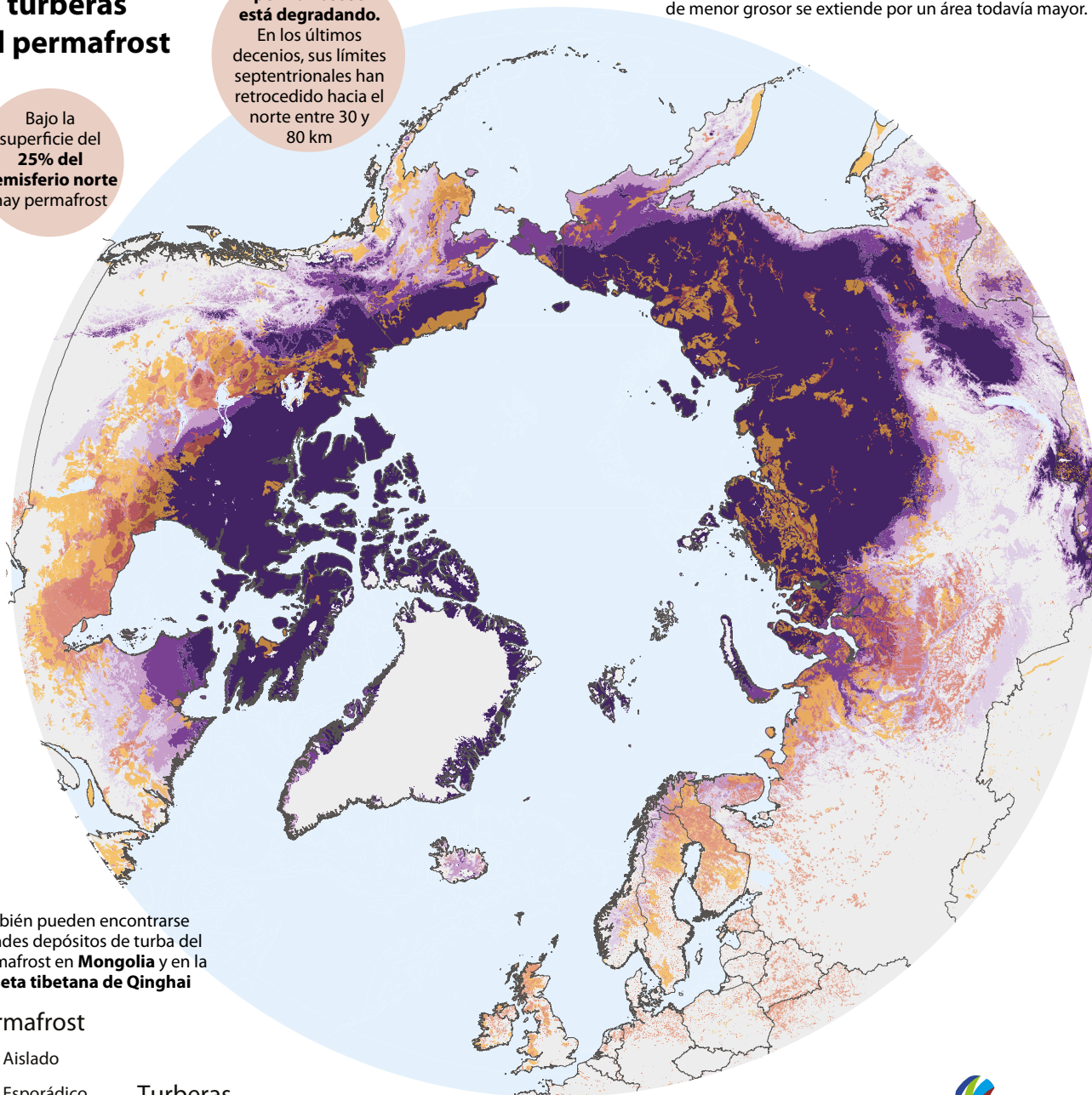
Fotografía: Hans Joosten

## 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 km<sup>2</sup>**, 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)<sup>90</sup>



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  $\text{CO}_2$  y metano ( $\text{CH}_4$ )

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

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 — $\text{CO}_2$  o  $\text{CH}_4$ — que se emiten como gases a la atmósfera o como carbono orgánico disuelto o carbono orgánico particulado que es transportado hasta los ríos

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

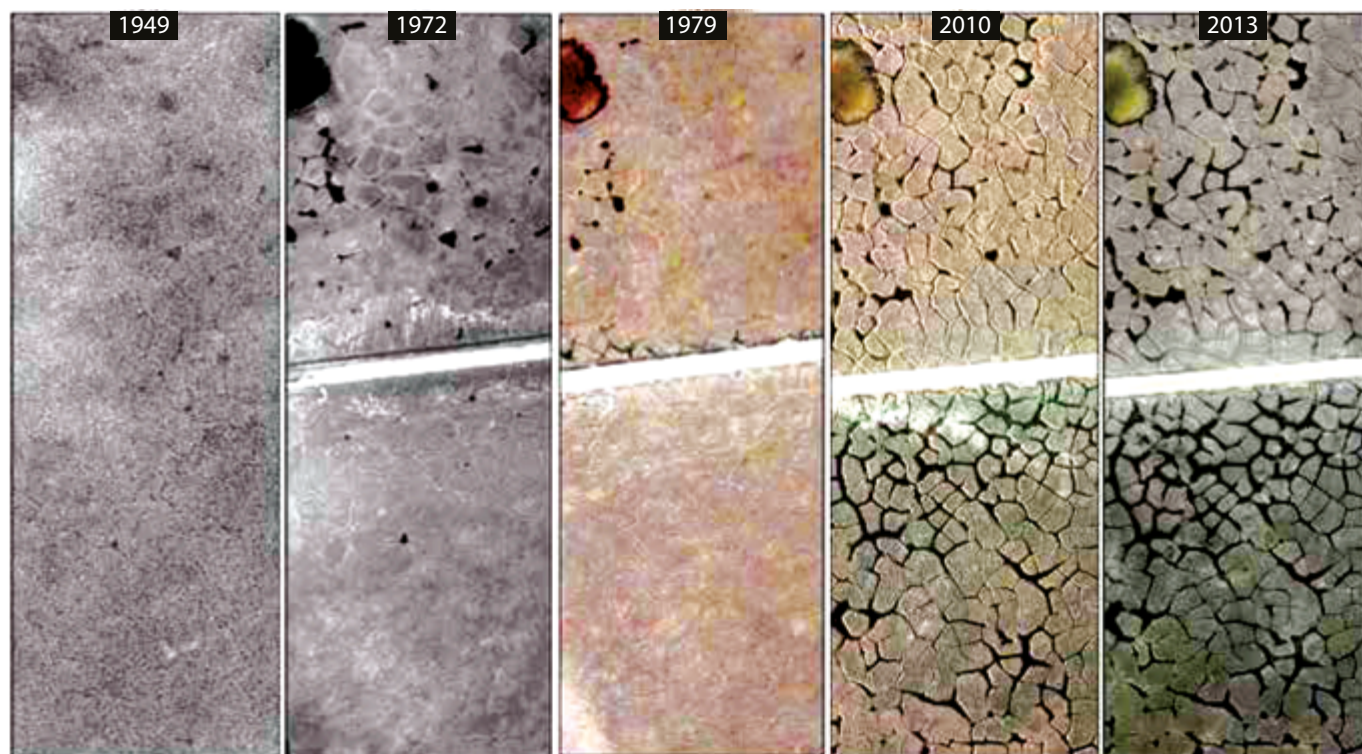


## Creciente sensibilización acerca de las turberas del permafrost

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 Suecia<sup>63</sup>. 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<sup>64,65</sup>. 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 Naciones<sup>66</sup>.

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)<sup>52</sup>



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<sup>15,67</sup>. 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 turba<sup>68</sup>, 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<sup>66,69</sup>. 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 km<sup>2</sup> 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 iniciado<sup>70</sup>. 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 eficaces<sup>15</sup>. 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<sup>30,63</sup>. Para evaluar de manera oportuna la situación global del permafrost es necesario ampliar las redes de investigación a

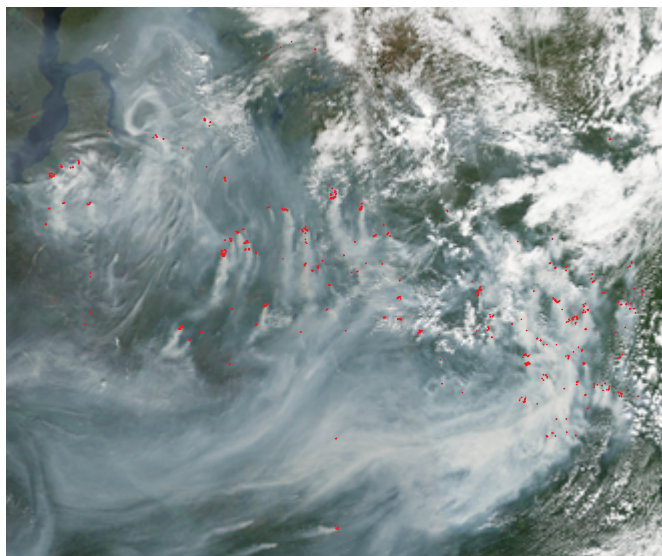


Imagen obtenida por satélite el 19 de julio de 2016 en la que se aprecia un humo denso sobre las turberas del permafrost al norte de la zona central de Rusia. Los puntos rojos indican temperaturas superficiales elevadas, probablemente a causa de incendios en la turba.

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<sup>15,64</sup>. 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 permafrost<sup>64</sup>.

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](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<sup>22,30</sup>. 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 actual<sup>15</sup>. 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 norteros 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

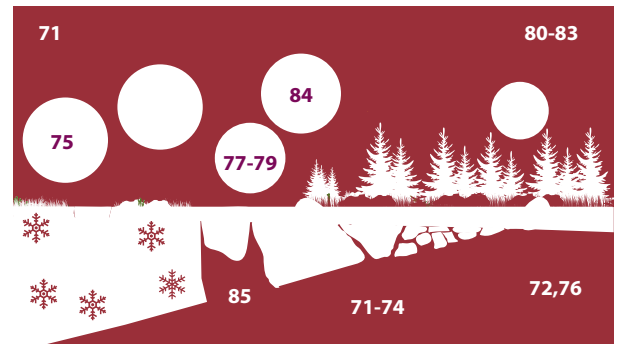
1. Leifeld, J. and Menichetti, L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications* 9, 1071. <https://www.nature.com/articles/s41467-018-03406-6>
2. Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, 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). *Circum-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](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](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](https://www.geobotany.uaf.edu/library/pubs/WalkerDA2014_agc14-01.pdf)

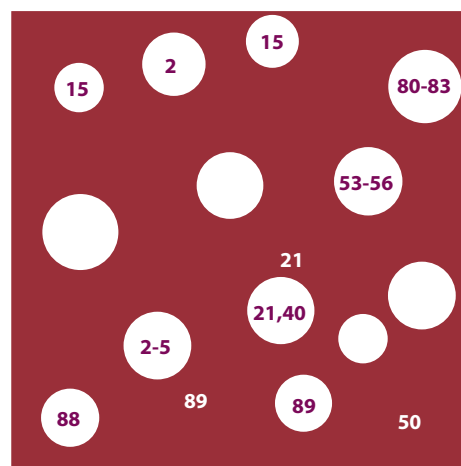
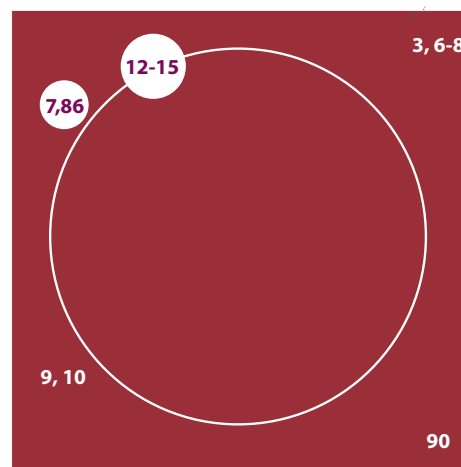
53. Vlassova, T. (2002). Human impacts on the tundra-taiga zone dynamics: the case of the Russian lesotundra. *Ambio Special Report*, 12, 30–36.
54. Instanes, A. (2016). Incorporating climate warming scenarios in coastal permafrost engineering design – Case studies from Svalbard and northwest Russia. *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](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.ontla.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](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>