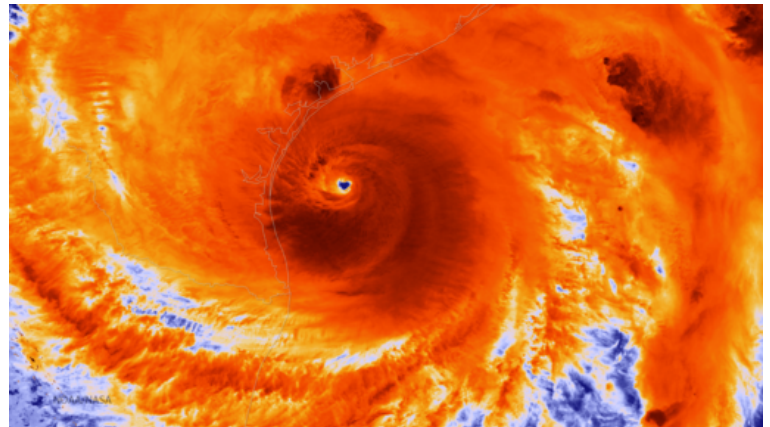


Exceso de confianza en el sobregiro climático

Carl-Friedrich Schleussner et al¹

Síntesis

Los esfuerzos de reducción de las emisiones globales siguen siendo insuficientes para alcanzar el objetivo de temperatura del Acuerdo de París¹. Esto hace que la exploración sistemática de las denominadas vías de sobregiro, que superan temporalmente el límite de calentamiento global fijado antes de reducir las temperaturas a niveles más seguros, sea una prioridad para la ciencia y la política^{2,3,4,5}. Aquí demostramos que el cambio climático global y regional y los riesgos asociados tras un sobregiro son diferentes de los de un mundo que lo evita. Comprobamos que lograr un descenso de las temperaturas globales puede limitar los riesgos climáticos a largo plazo en comparación con una mera estabilización del calentamiento global, incluso para la subida del nivel del mar y los cambios en la criosfera. Sin embargo, la posibilidad de que el calentamiento global se revierta muchas décadas en el futuro podría tener una relevancia limitada para la planificación de la adaptación en la actualidad. La reversión de la temperatura podría verse socavada por las fuertes retroalimentaciones del sistema Tierra, que darían lugar a un calentamiento elevado a corto plazo y continuo a largo plazo^{6,7}. Para protegerse de los resultados de alto riesgo, identificamos la necesidad geofísica de una capacidad preventiva de eliminación de dióxido de carbono de varios cientos de gigatoneladas. Empero, las consideraciones técnicas, económicas y de sostenibilidad pueden limitar el despliegue de la eliminación de dióxido de carbono a tales escalas^{8,9}. Por lo tanto, no podemos confiar en que el descenso de la temperatura tras el sobregiro pueda conseguirse en los plazos previstos hoy en día. Sólo una reducción rápida de las emisiones a corto plazo es eficaz para reducir los riesgos climáticos.



El huracán Harvey en la costa de Texas, agosto de 2017
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Harvey_2017-08-25_1855Z.png
NOAA National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS), Public domain, via Wikimedia Commons

Inicio

La posibilidad de superar los niveles peligrosos de calentamiento global y, posteriormente, volver a situarlos por debajo de dichos niveles ha sido un tema de debate durante décadas¹⁰, y desde el principio se ha considerado que la

¹ Ver todos los autores y sus contribuciones y afiliaciones al final del artículo.

eliminación de dióxido de carbono (EDC) a gran escala desempeñaría un papel importante en esta reversión de la temperatura^{11,12}. Desde la adopción del Acuerdo de París en 2015, la cuestión ha adquirido mayor relevancia.

El objetivo de temperatura del Acuerdo de París permite cierta ambigüedad en su interpretación, pero establece 1,5 °C de calentamiento global como límite superior a largo plazo para el aumento de la temperatura global^{13,14}. Esto significa que si 1,5 °C se supera temporalmente (lo que posteriormente se denomina sobregiro), una inversión del calentamiento por debajo de ese límite forma parte del cumplimiento de la ambición a largo plazo del Acuerdo de París¹³. El texto del Acuerdo de París no indica que la temperatura deba estabilizarse, sino que establece límites superiores por debajo de los cuales las temperaturas deben alcanzar su punto máximo y luego pueden descender. Este entendimiento se refuerza aún más al considerar otros elementos del Acuerdo de París. Se espera que el logro de cero emisiones globales netas de gases de efecto invernadero (GEI), tal y como implica el Artículo 4.1 del Acuerdo, conduzca a un descenso de las temperaturas^{6,13}.

Las trayectorias globales de emisiones de GEI desempeñan un papel fundamental a la hora de informar sobre el desarrollo de puntos de referencia políticos en consonancia con el Acuerdo de París y son una parte esencial de las evaluaciones del cambio climático realizadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)^{2,15}. Estas evaluaciones clasifican las vías principalmente en función de su temperatura máxima^{2,15}. Dado que un pico y una inversión gradual del calentamiento global resultan ser una característica fundamental de las vías compatibles con el Acuerdo de París¹⁶, proponemos en adelante categorizar las vías en función de sus características de pico y declive (Tabla 1).

Tabla 1 Categorías conceptuales de trayectorias de emisiones máximas y mínimas

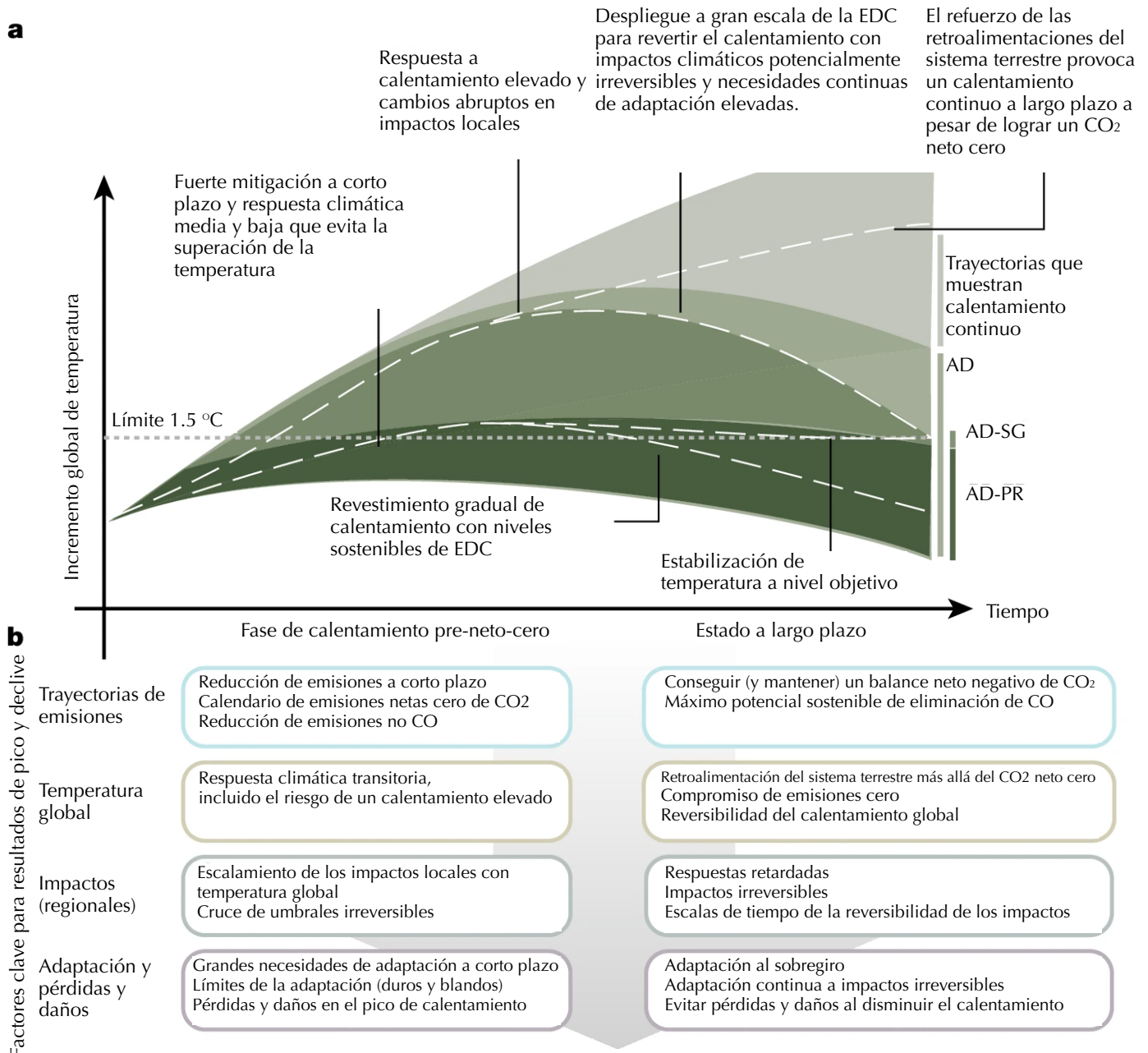
Categoría de trayectorias	Características de temperatura	
AD: trayectorias de ascenso y descenso	Trayectorias encaminadas a alcanzar el punto máximo de temperatura y un descenso sostenido de la temperatura a largo plazo de al menos varias décadas de duración.	Reducción de las emisiones de todos los gases de efecto invernadero para lograr cero emisiones netas de CO ₂ y, a partir de entonces, emisiones netas negativas de CO ₂ .
AD-SG: trayectorias del sobregiro	Las trayectorias AD establecen un nivel de calentamiento objetivo que debe alcanzarse en algún momento en un futuro lejano, pero permiten que se supere con alta probabilidad a corto plazo con la convicción de que el calentamiento puede invertirse de nuevo en una fase posterior. Estas trayectorias suelen prever que la temperatura se mantenga en el nivel objetivo al regresar tras un sobregiro.	Como las trayectorias del pico y del declive, pero la tasa de reducción de emisiones, el presupuesto de carbono, el momento de llegar a CO ₂ cero neto y la cantidad de emisiones negativas netas dependen de las características del sobregiro previsto, incluidas las consideraciones sobre las incertidumbres de la respuesta climática.
AD-PR: trayectorias de protección reforzadas	Trayectorias de AD que pretenden mantener el pico de calentamiento global lo más bajo posible e invertir gradualmente el calentamiento posterior para reducir los riesgos climáticos. Habida cuenta de los plazos necesarios para invertir el calentamiento, estas vías no suelen alcanzar un nivel de temperatura objetivo inferior en el marco temporal del escenario considerado.	Reducción estricta y rápida de las emisiones de GEI tanto y tan pronto como sea posible, logrando emisiones netas cero de CO ₂ lo antes posible minimizando las emisiones residuales, y alcanzando niveles sostenibles de emisiones netas negativas de CO ₂ a partir de entonces para llegar potencialmente a emisiones netas cero o netas negativas de GEI.

Véase la [Tabla 1](#) de Datos Ampliados para una comparación con las categorías propuestas en la literatura científica.

Las trayectorias de pico y de declive se diferencian por el rigor de los esfuerzos de reducción de emisiones a corto plazo y hasta alcanzar emisiones netas de CO₂ nulas, y por las emisiones netas negativas de CO₂ supuestas a largo plazo¹⁶. Las primeras determinan las emisiones de CO₂ máximas acumuladas de una vía y, por tanto, aproximadamente la

magnitud y el momento del pico de calentamiento para los resultados climáticos medios^{6,16} (Fig. 1a). El segundo determina el ritmo de reversión potencial de la temperatura¹⁶. Ambos aspectos dependen además de la evolución temporal de las emisiones distintas del CO₂.

Fig. 1: Resultados climáticos ilustrativos bajo diferentes categorías conceptuales de trayectorias de máximos y mínimos



a, Diferentes clases de trayectorias con un pico y un descenso de la temperatura media global (véase también la Tabla 1). Se resaltan las trayectorias individuales estilizadas (líneas discontinuas) para ilustrar las dimensiones específicas de impacto, adaptación y EDC asociadas a las distintas categorías. b, Visión general de los factores clave que afectan a las trayectorias y a los posibles resultados de pico y descenso a lo largo de la cadena de impacto para la fase de calentamiento hasta el CO₂ neto cero y para el largo plazo más allá del CO₂ neto cero. AD, trayectorias de pico y declive; AD-SG, trayectorias de protección reforzada; AD-PR, trayectorias de sobregiro.

En la literatura científica se han propuesto varias categorías de trayectorias de máximos y mínimos^{2,17} (Tabla 1 de [datos ampliados](#)). Un ejemplo destacado es la última contribución del Grupo de Trabajo III (GTIII) al Sexto Informe de Evaluación (IE6) del IPCC, que incluye dos categorías de vías que hacen referencia explícita al término sobregiro (Tabla 1 de [datos ampliados](#)). Las vías de sobregiro de la temperatura son una subcategoría de la categorización de máximos y mínimos que presentamos aquí, cuya característica distintiva es que se supera temporalmente el límite máximo de temperatura previsto (1,5 °C).

Aunque se definen en términos de probabilidades de superar temporalmente los 1,5 °C, las categorías de trayectorias del AR6 del IPCC enmarcan un posible sobregiro de forma concreta: el sobregiro limitado (C1) se refiere a superar el límite especificado hasta aproximadamente 0,1 °C, mientras que el sobregiro elevado (C2) se refiere a superarlo en más de 0,1 °C y hasta 0,3 °C (refs. 2,15) (Tabla 1 de [datos ampliados](#)). Esto parece sugerir que los sobregiros de temperatura en estas categorías de trayectorias están limitados a unas pocas décimas de grado con gran certeza. Pero no es así. Estas cifras de sobregiro se refieren únicamente a los resultados medios y no puede descartarse un calentamiento sustancialmente mayor, como se muestra a continuación. Centrarse en los resultados medios podría llevar a un exceso de confianza en los riesgos de las trayectorias de sobregiro.

A continuación, esbozamos las dimensiones del exceso de confianza en el sobregiro, desde las trayectorias de emisión hasta las implicaciones para la adaptación (Fig. 1b). Comenzamos explorando las incertidumbres en los resultados de la temperatura global y sus implicaciones para las emisiones netas negativas de CO₂ necesarias para lograr la inversión prevista del calentamiento. A partir de ahí, analizamos las consecuencias para las estrategias de mitigación, teniendo en cuenta las limitaciones de viabilidad y sostenibilidad de la implantación de EDC a escala de gigatoneladas. Sin embargo, incluso si las temperaturas globales disminuyeran, queda abierta la cuestión de si esto se traduce en una reversión de los impulsores del impacto climático⁶ y de los consiguientes impactos y riesgos, y de qué manera. Aportamos ideas tanto sobre los cambios climáticos regionales a largo plazo como sobre los riesgos irreversibles, como la subida del nivel del mar. Por último, analizamos lo que implica para la adaptación al cambio climático considerar o experimentar un sobregiro de la temperatura. Basándonos en esta perspectiva global, sostenemos que es esencial reorientar el debate sobre el sobregiro hacia la priorización de la reducción de los riesgos climáticos tanto a corto como a largo plazo, y que debe evitarse el exceso de confianza en la controlabilidad y la conveniencia del sobregiro climático.

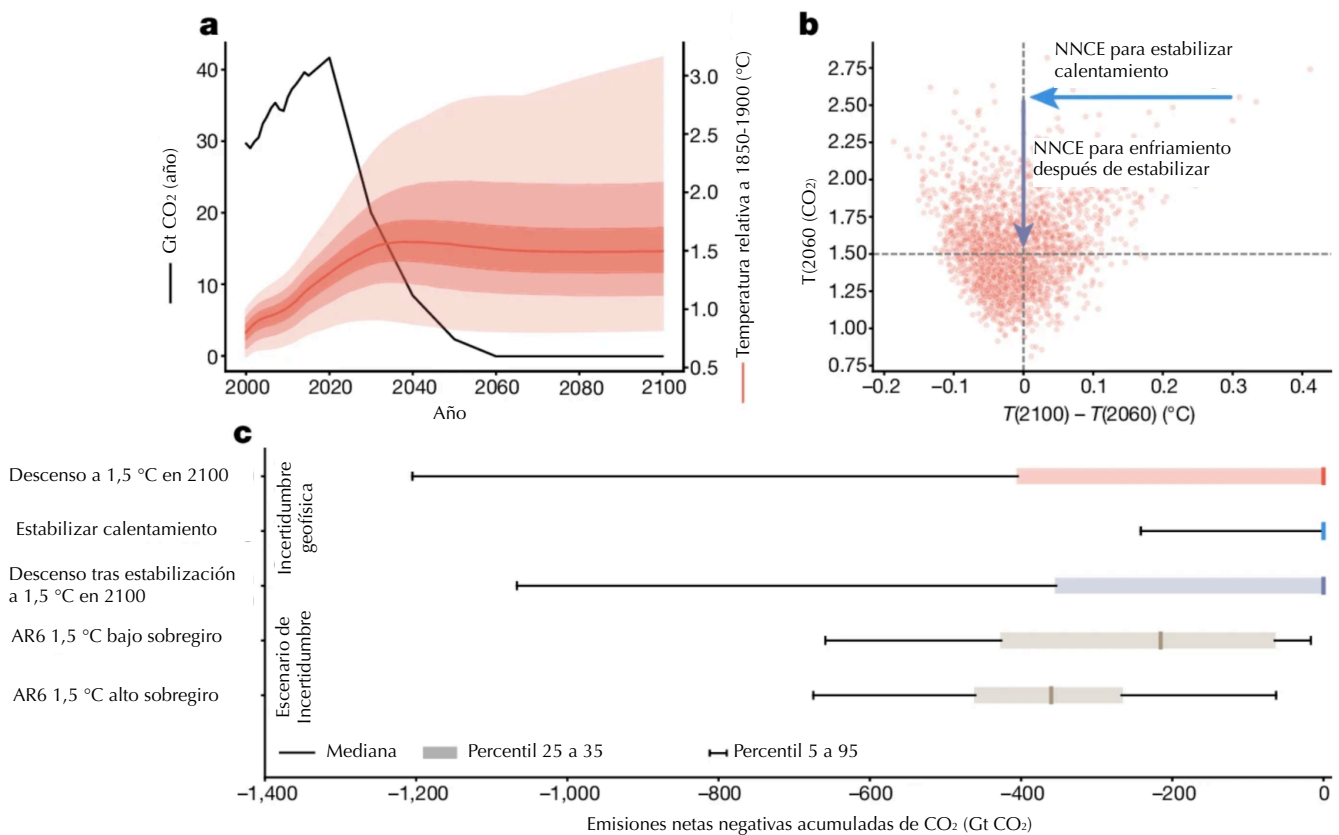
Respuesta climática incierta y reversión

El pico de calentamiento depende de las emisiones de CO₂ acumuladas hasta llegar a CO₂ cero neto global y del rigor de las reducciones de GEI distintos del CO₂. Alcanzar emisiones netas negativas de CO₂ (NNCE) después del pico de calentamiento puede dar lugar a una disminución del calentamiento a largo plazo⁶. La mayoría de las estimaciones de NNCE coherentes con una inversión a largo plazo del calentamiento en trayectorias de pico y declive se han centrado en resultados de calentamiento medios¹⁵. Sin embargo, para evaluar de forma exhaustiva los riesgos de sobregiro y los requisitos de NNCE para la inversión del calentamiento, también deben tenerse en cuenta las incertidumbres en la respuesta climática. Entre ellas se incluyen las incertidumbres durante la fase de calentamiento (por ejemplo, resultados de calentamiento elevados debidos a retroalimentaciones de calentamiento amplificadoras)¹⁸ y en el estado a largo plazo (potencial de calentamiento continuo después de CO₂ neto cero y la respuesta del sistema climático a la NNCE)⁷.

Exploramos los requisitos de la NNCE para una trayectoria ilustrativa con las siguientes características (Fig. 2a): (1) alcanza un CO₂ neto nulo a mediados de siglo; (2) limita el pico de calentamiento medio a cerca de 1,5 °C por encima

de los niveles preindustriales; y (3) no requiere NNCE para lograrlo (para el resultado de calentamiento medio). Utilizamos 2.237 miembros del conjunto del ciclo simple del carbono y el modelo climático Finite Amplitude Impulse Response (FaIR) v.1.6.2 para estimar el rango de resultados de calentamiento físicamente plausibles para esta trayectoria, en consonancia con la evaluación de incertidumbre del AR6 del IPCC (Fig. 2a y Métodos). Destacan dos grupos de futuros plausibles. El primero incluye futuros de riesgo relativamente bajo en los que el calentamiento alcanza su punto máximo por debajo de 1,5 °C en el momento en que se alcanza el CO2 neto cero, o antes (Fig. 2b, abajo a la izquierda); en estos casos, no se requieren NNCE. También identificamos futuros de riesgo relativamente alto en los que el calentamiento supera los 1,5 °C en el momento de alcanzar el CO2 neto cero y continúa más allá (Fig. 2b, arriba a la derecha).

Fig. 2: Estimación de las necesidades acumuladas de NNCE cuando se tiene en cuenta la incertidumbre de la respuesta climática



a, Emisiones netas de CO2 para la trayectoria PROVIDE REN_NZCO2 (línea negra) y la incertidumbre del resultado del calentamiento (derivado utilizando FaIR v.1.6.2; Métodos). El resultado de calentamiento medio es la línea sólida roja, con cada penacho subsiguiente de transparencia variable que representa el percentil 25-75, el percentil 5-95 y los rangos mínimo a máximo, respectivamente. b, Calentamiento en el momento de CO2 cero neto (2060) comparado con el cambio de temperatura entre CO2 cero neto y 2100. c, NNCE estimada para devolver el calentamiento para cada resultado de calentamiento máximo mostrado en b a 1,5 °C en 2100 (Métodos). Estas estimaciones reflejan la NNCE implícita en la incertidumbre geofísica del resultado del calentamiento basado en la trayectoria REN_NZCO2 (de arriba a abajo: NNCE para alcanzar 1,5 °C en 2100, NNCE para estabilizar el calentamiento, NNCE para el declive tras la estabilización). Para comparar, se muestra la incertidumbre del escenario en las categorías C1 y C2 del informe AR6 WGIII del IPCC (filas inferiores). Obsérvese que la incertidumbre de este escenario sólo tiene en cuenta las estimaciones medias de la respuesta geofísica a las emisiones.

Para cada ejecución FaIR respectiva, estimamos el requisito de NNCE para que el calentamiento vuelva a 1,5 °C en 2100 (Métodos). Encontramos que no se puede descartar la necesidad de un gran despliegue de NNCE debido a la

distribución de incertidumbre de la respuesta climática con colas pesadas¹⁸ (Fig. 2c). La escala de este despliegue (rango intercuartílico: 0 a -400 Gt CO₂ acumulativas hasta 2100, o 0 a -10 Gt CO₂ año⁻¹ después de 2060) es del mismo orden de magnitud que la dispersión de NNCE desplegadas en los escenarios evaluados en el AR6 WGIII del IPCC (Fig. 2c). Aunque hemos observado que predominan las necesidades de NNCE derivadas de un pico de calentamiento superior a la media debido a una fuerte respuesta climática transitoria, podrían ser necesarias NNCE acumuladas hasta 2100 de hasta 200 Gt de CO₂ (o 5 Gt de CO₂ anuales⁻¹, percentil superior del 95%, Fig. 2c) para protegerse frente a un mayor calentamiento más allá del cero neto¹⁹. Nuestros resultados demuestran que centrarse únicamente en la incertidumbre de los escenarios y en el calentamiento medio no basta para evaluar las posibles necesidades de despliegue de EDC, ni siquiera para alcanzar una temperatura media mundial estable en el siglo XXI.

Las necesidades de EDC se refieren aquí a la eliminación adicional de carbono debida a la actividad antropogénica, en consonancia con las convenciones y definiciones de los modelos en los que se basa nuestra evaluación. Es importante señalar que las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático utilizan una definición diferente para definir los flujos de carbono terrestre, lo que se traduce en una diferencia de aproximadamente 4-7 Gt CO₂ yr⁻¹ entre los inventarios nacionales de GEI y los modelos científicos que debe tenerse en cuenta a la hora de traducir estos conocimientos en asesoramiento político²⁰.

Nuestro sencillo enfoque ilustrativo tiene varias limitaciones que convendría explorar más a fondo, incluso con modelos del sistema Tierra (MST)²¹ de última generación. Se plantean cuestiones especialmente relevantes en torno a la asimetría de la respuesta del sistema Tierra a las emisiones positivas o negativas de CO₂^{22,23} (Métodos). Debido a la falta de datos de entrenamiento adecuados, la respuesta de los modelos climáticos simples a la NNCE no está bien acotada. Además, los MST utilizados para calibrar los modelos climáticos simples pueden pasar por alto respuestas no lineales en el sistema climático, incluida la desestabilización brusca de los sumideros naturales de carbono²⁴ (por ejemplo, la liberación de CO₂ y CH₄ del permafrost, la pérdida de carbono de la turba por el cambio climático y la degradación o conversión de las turberas, los incendios extremos y la mortalidad de los bosques por sequía). A continuación analizamos las respuestas del permafrost y las turberas al sobregiro (Fig. 4).

Confiar en el EDC

Para alcanzar los objetivos de la NNCE es necesario desplegar una EDC que supere las emisiones residuales en sectores difíciles de reducir. Las trayectorias evaluadas por el Grupo de Trabajo III del IPCC utilizan la RCD de distintas maneras y en distintos grados³. La expansión de la RCD es más rápida en las trayectorias con los picos de calentamiento más bajos (trayectorias con un sobregiro bajo o nulo de 1,5 °C, C1, [datos ampliados](#) Fig. 3). En el conjunto de trayectorias de emisiones, los niveles de EDC a finales de siglo son generalmente más altos en las trayectorias con un sobregiro elevado (C2), pero el rango completo (5-95%) es similar al de la trayectoria C1. Las trayectorias que mantienen el calentamiento por debajo de 2 °C pero no lo limitan a 1,5 °C en 2100 (C3) registran un aumento sustancial de la EDC en la segunda mitad del siglo XXI, alcanzando niveles comparables a los de las trayectorias C1 en 2080 ([datos ampliados](#), Fig. 3). La cantidad total de EDC desplegada en las trayectorias hasta 2100 depende principalmente de la reducción efectiva de las emisiones positivas residuales de CO₂ y de la mitigación de los GEI distintos del CO₂¹⁷.

En la sección anterior, mostramos cómo el alcance de la EDC necesaria para alcanzar temperaturas estables en el siglo XXI podría estar muy infravalorado. Aquí destacamos que existen múltiples áreas en las que las trayectorias actuales podrían ser excesivamente confiadas en su supuesto uso de la EDC (Tabla 2 de [datos ampliados](#)). La ampliación de la EDC puede verse considerablemente limitada⁹ por factores como la falta de apoyo político y de modelos empresariales,

la incertidumbre tecnológica y la oposición pública (por ejemplo, la percepción de los riesgos de retrasar la mitigación²⁵). Incluso si los potenciales técnicos de eliminación resultan ser grandes, las consideraciones de sostenibilidad y equidad limitarían las escalas de despliegue aceptables^{8,9}. La falta de preparación tecnológica puede ser un obstáculo importante, ya que las tasas actuales de eliminación con métodos de EDC distintos de la forestación y la reforestación son minúsculas (unas 2 Mt de CO₂ al año⁻¹)²⁶ y requerirían un aumento de más de 1.000 veces para 2050 (ref. 27). Más allá de las preocupaciones tecnológicas, una serie de problemas de permanencia imprevistos o inciertos y la retroalimentación del sistema (Tabla 2 de [datos ampliados](#)) podrían reducir o contrarrestar la contribución de la EDC a la mitigación^{26,28}.

Resulta difícil conciliar estas preocupaciones de viabilidad con la necesidad potencial de desplegar EDC a escala de gigatoneladas para hacer frente a la incertidumbre climática (Fig. 2). Sostenemos que las trayectorias de despliegue que aborden este reto deberían guiarse por el principio de prevención de daños²⁹ en el marco de trayectorias de protección reforzada (Tabla 1). Este enfoque requiere dos acciones complementarias: (1) reducir rápidamente las emisiones brutas de CO₂ para reducir las necesidades totales de EDC y (2) abordar las preocupaciones de viabilidad para facilitar el despliegue de EDC más allá de la consecución de CO₂ neto cero para protegerse frente a resultados de calentamiento potencialmente elevados.

Reversibilidad regional del cambio climático

La propuesta de las trayectorias de sobregiro es que el fracaso a la hora de mantener el calentamiento por debajo de un límite de temperatura deseado es aceptable siempre que el calentamiento global vuelva a situarse por debajo de un determinado nivel, es decir, 1,5 °C, a largo plazo. Incluso si se revierten las temperaturas globales, esto no es algo seguro para los cambios climáticos regionales. Por lo tanto, es importante comprender las implicaciones de un sobregiro de la temperatura global para los cambios regionales. Incluso si el calentamiento global se estabiliza en un determinado nivel sin sobregiro, el sistema climático continúa cambiando a medida que sus componentes siguen ajustándose y equilibrándose³⁰, con implicaciones para los patrones climáticos regionales. La cuestión que se plantea entonces es qué huellas adicionales sobre el clima regional pueden originarse directamente del sobregiro.

Aquí exploramos un conjunto único de simulaciones de modelización específicas que comparan el sobregiro y la estabilización a largo plazo en dos MST y hallamos diferencias sustanciales en los conductores del impacto climático regional en escalas temporales de varios siglos (Fig. 3 y [datos ampliados](#) Fig. 5). Utilizamos los resultados del modelo NorESM2-LM siguiendo un protocolo basado en las emisiones que conceptualiza un sobregiro del balance de carbono, así como simulaciones del GFDL-ESM2M siguiendo el Enfoque Adaptativo de Reducción de Emisiones (AERA) para ajustarse a una trayectoria de temperatura media global predefinida (Métodos y [datos ampliados](#) Fig. 4). A pesar de estas diferencias en los protocolos de modelización, encontramos algunas características dentro de los patrones regionales de sobregiro frente a estabilización que emergen en ambas simulaciones de modelización, en particular en las altas latitudes septentrionales como resultado de una respuesta retardada de la Circulación Meridional de Vuelco del Atlántico (AMOC)^{4,31}.

En el modelo NorESM2-LM, observamos una reversión de la escala de temperaturas regionales con el cambio de la temperatura media global del aire en superficie (GMST) para el Atlántico Norte y las regiones terrestres europeas adyacentes en situación de sobregiro (Fig. 3c), que conduce a un enfriamiento regional temporal y a una posterior recuperación y calentamiento regionales³² (Fig. 3e). El patrón en el que el Atlántico Norte se enfría regionalmente a pesar del calentamiento planetario también está presente en el escenario de estabilización, pero es menos pronunciado.

En el modelo GFDL-ESM2M, la huella del sobregiro y la estabilización en el clima regional es menos pronunciada. Pero también son evidentes los cambios de temperatura asociados a una recuperación retardada del AMOC unos 100 años después del pico de calentamiento y a niveles más altos que en el escenario de estabilización (Fig. 3d,f). Cabe señalar que estas simulaciones no incluyen el aumento de la afluencia de agua de deshielo de Groenlandia, que podría suprimir una posible recuperación del AMOC en caso de sobregiro³³. En ambos modelos se observan características similares en las precipitaciones, en particular en relación con los movimientos de la Zona de Convergencia Intertropical en respuesta a los cambios en el AMOC4 ([datos ampliados](#) Fig. 5). Las simulaciones de sobregiro transitorio multimodelo corroboran aún más el hallazgo de que la dinámica del AMOC y los cambios relacionados en el clima regional son una característica dominante de las trayectorias de sobregiros^{5,32} (Métodos y [datos ampliados](#) Figs. 7 y 8). También indican un calentamiento continuo del Océano Austral en relación con el resto del globo como resultado de patrones de respuesta rápida y lenta, y cambios en el clima regional tras la reducción de las cargas de aerosoles (en particular en el sur y el este de Asia)¹⁸. En conjunto, nuestros resultados sugieren que los cambios climáticos regionales no pueden aproximarse bien mediante el GMST tras el pico de calentamiento.

Encontramos huellas sustanciales a largo plazo del sobregiro en el clima regional (Fig. 3c,d) que son distintas de los cambios transitorios en los escenarios de estabilización ([Datos Ampliados](#) Fig. 6). Sin embargo, persisten diferencias sustanciales en la dinámica de los modelos (comparar Fig. 3e,f). Se requieren experimentos específicos de intercomparación multimodelo para seguir investigando las consecuencias a largo plazo del sobregiro en comparación con la estabilización²¹. También señalamos la importancia de la retroalimentación biofísica climática de los cambios en la cubierta terrestre asociados al despliegue a gran escala de EDC en tierra ((Tabla 2 de [Datos Ampliados](#)) que podría explorarse en estos experimentos.

Impactos retardados e irreversibles

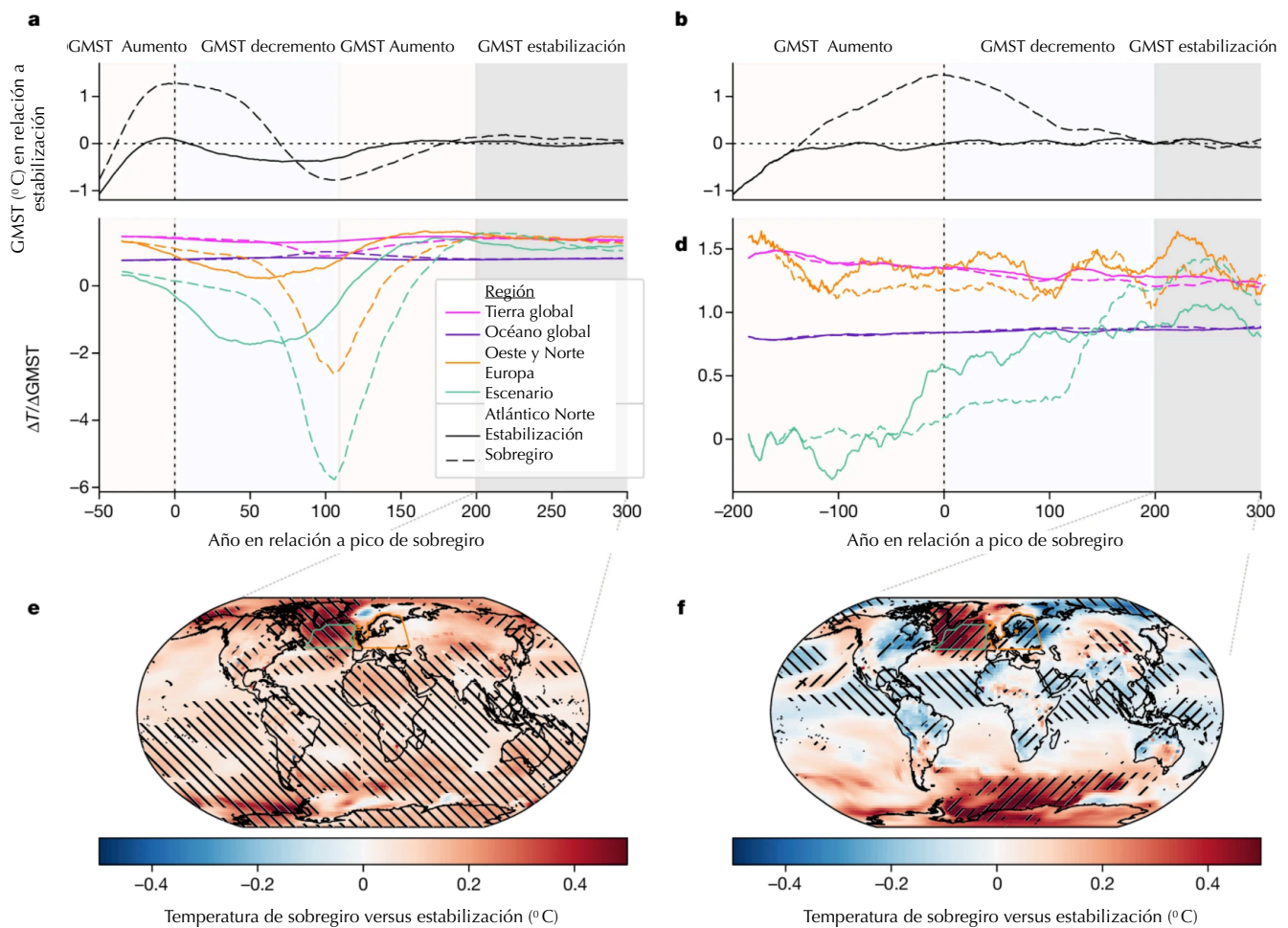
En una serie de impactos climáticos, no cabe esperar una reversibilidad inmediata tras un sobregiro. Esto incluye los cambios en las profundidades oceánicas, la biogeoquímica marina y la abundancia de especies³⁴, los biomas terrestres, las reservas de carbono y el rendimiento de los cultivos³⁵, pero también la biodiversidad terrestre³⁶. Un sobregiro también aumentará la probabilidad de que se desencadenen posibles elementos de inflexión del Sistema Tierra³³. El nivel del mar seguirá subiendo durante siglos o milenios, incluso si las temperaturas a largo plazo disminuyen³⁷.

Una evaluación exhaustiva de los riesgos climáticos futuros en el marco de trayectorias de pico y declive requiere centrarse no sólo en las consecuencias (irreversibles) de un sobregiro temporal, sino también en los beneficios de la reversión de la temperatura a largo plazo, en comparación con la estabilización a niveles más altos. Aquí exploramos las consecuencias del sobregiro en un conjunto de trayectorias de pico y declive ([Métodos](#)) que logran GEI netos cero y, por tanto, un descenso de la temperatura a largo plazo en comparación con la estabilización en el pico de calentamiento (manteniendo CO2 neto cero).

Para el aumento global del nivel del mar, encontramos que cada 100 años de sobregiro por encima de 1,5 °C lleva a un compromiso adicional de aumento del nivel del mar de alrededor de 40 cm para 2300 (estimación central) aparte de una línea base de alrededor de 80 cm sin sobregiro (Fig. 4a). Para los resultados de alto riesgo, el compromiso de aumento del nivel del mar en 2300 podría ser unas tres veces (percentil 95) superior a la estimación central³⁷ (([Datos Ampliados](#) Fig. 10). El descenso de la temperatura a largo plazo en torno a 0,03-0,04 °C por década (coherente en líneas generales con la consecución de unos GEI netos nulos) evita unos 40 cm de aumento del nivel del mar en 2300

(estimación mediana, percentil 95 en torno a 1,5 m) en comparación con la estabilización en el pico de calentamiento (Fig. 4b).

Fig. 3: Evolución de las temperaturas regionales antes y después del sobregiro en comparación con la estabilización de la temperatura global

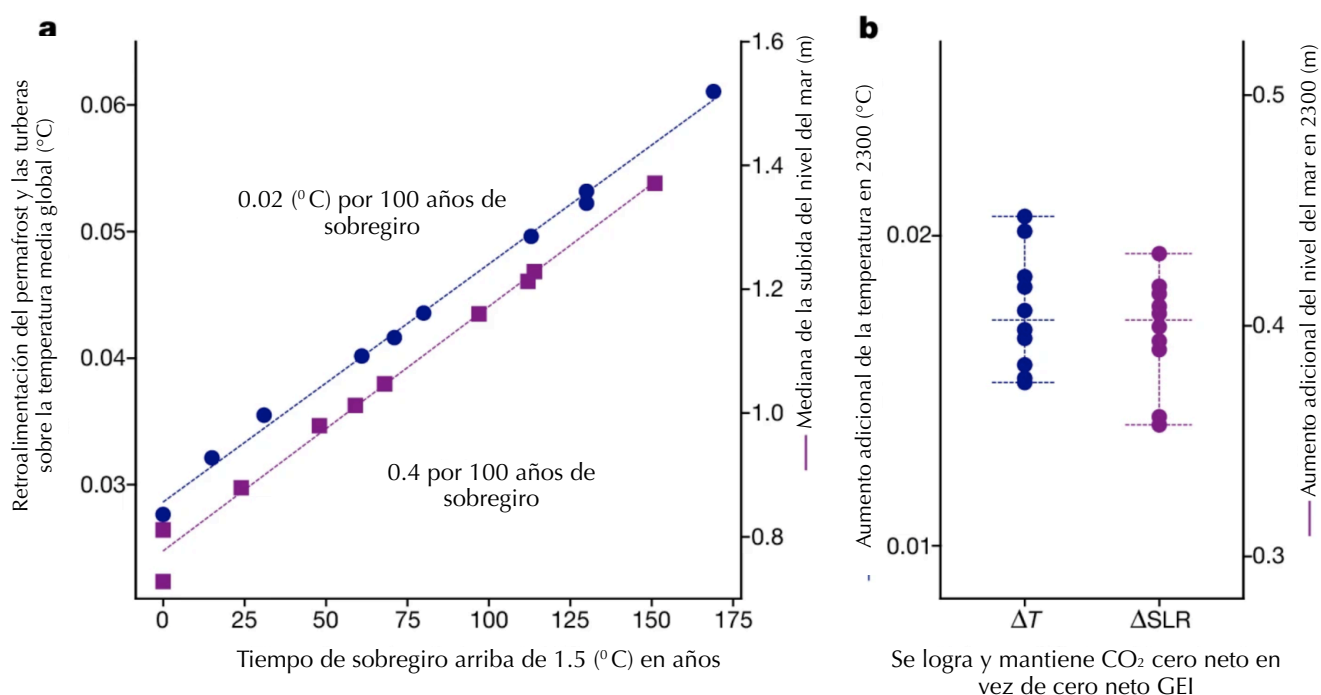


Resultados para un protocolo de sobregiro del presupuesto de carbono con el modelo NorESM4 (a,c,e) y un protocolo centrado en la temperatura global (GFDL-ESM2M)49 (b,d,f). a,b, Trayectorias del GMST para escenarios específicos de estabilización climática (sólido) y sobregiro (discontinuo). c,d, Evolución temporal de los coeficientes de escala de las temperaturas regionales anuales con la GMST para las zonas terrestres y oceánicas mundiales, así como para el Océano Atlántico Norte (al norte de 45° N) y Europa occidental y septentrional (anomalías medias de 31 años en relación con 1850-1900). e,f, Diferencias regionales de la temperatura anual entre los escenarios de sobregiro y estabilización a lo largo de 100 años de estabilización de la GMST a largo plazo (zona sombreada en gris en a,b). El sombreado en e,f resalta las cuadrículas en las que la diferencia supera el percentil 95 (está por debajo del percentil 5) de diferencias de periodos comparables en simulaciones piControl ([Métodos](#)).

Un patrón similar emerge para el deshielo del permafrost en 2300 y el calentamiento de las turberas septentrionales que conducen a un aumento de la descomposición del carbono del suelo y de la liberación de CO₂ y CH₄ (Fig. 4 y [Datos Ampliados](#) Fig. 9). El efecto de las emisiones del permafrost y de las turberas sobre las temperaturas de 2300 aumenta en 0,02 °C por cada 100 años de sobregiro (mejor estimación, percentil superior del 95% 0,04 °C, ([Datos Ampliados](#) Fig. 10), mientras que el logro de temperaturas decrecientes a largo plazo reduciría el aumento adicional de la temperatura de 2300 en un orden de magnitud similar. Advertimos que la relación lineal diagnosticada entre la duración del sobregiro y el resultado del impacto puede depender del conjunto de trayectorias de las que se derivó. Las trayectorias

subyacentes suponen sobregiros a partir de un periodo de retraso en la acción climática seguido de una reducción constante hasta llegar a cero emisiones netas de GEI, lo que implica un ritmo similar de descenso de la temperatura a largo plazo en todas las trayectorias. La relación podría ser diferente para resultados de sobregiro más o menos extremos.

Fig. 4: Efectos irreversibles a largo plazo del sobregiro sobre el permafrost, las turberas y el aumento del nivel del mar



a, Retroalimentación sobre el aumento de la temperatura media global en 2300 por emisiones de permafrost y turberas (marcadores azules y eje izquierdo) y aumento medio global del nivel del mar en 2300 (SLR, marcadores morados y eje derecho, de ref. 37) en función de la duración del sobregiro. Los círculos (cuadrados) marcan los resultados del cambio de temperatura (aumento del nivel del mar) para escenarios individuales de la ref. 37. b, Aumento adicional de la temperatura media global debido a las emisiones de permafrost y turberas inducidas por el calentamiento, y aumento del nivel del mar implícito en la estabilización de las temperaturas en el pico de calentamiento (alcanzando y manteniendo cero emisiones netas de CO₂) en comparación con un descenso de la temperatura a largo plazo resultante de alcanzar y mantener cero emisiones netas de GEI. Las líneas horizontales discontinuas en b indican la mediana del conjunto y el intervalo mínimo y máximo.

Impactos socioeconómicos

La gravedad de los riesgos climáticos para los sistemas humanos en caso de sobregiro depende en gran medida de su capacidad de adaptación³⁸, así como de la posible transgresión de los límites de adaptación³⁹. Un sobregiro por encima de 1,5 °C se produciría probablemente durante la primera mitad del siglo XXI, un periodo caracterizado aún por una capacidad de adaptación comparativamente baja en amplias zonas del planeta, incluso en escenarios optimistas de desarrollo socioeconómico³⁸. La coincidencia de sobregiro y baja capacidad de adaptación puede amplificar los riesgos climáticos. Esto tiene profundas consecuencias para la capacidad de lograr resultados de desarrollo equitativos y resilientes al clima en condiciones de sobregiro, en particular para los países, las comunidades y los pueblos más vulnerables.

Los impactos climáticos sobre la salud, los servicios ecosistémicos, los medios de subsistencia y la educación pueden dejar efectos negativos duraderos e intergeneracionales sobre el bienestar de las personas⁴⁰, como el exceso de muertes relacionadas con el clima vinculado a los extremos de calor durante un periodo de sobregiro. El sobregiro también puede dejar secuelas a largo plazo en los resultados económicos de los países, sobre todo los menos desarrollados, debido a los efectos duraderos del cambio climático en el crecimiento económico⁴¹. Por lo tanto, el sobregiro conlleva cuestiones profundamente éticas sobre cuántas pérdidas y daños adicionales relacionados con el clima tendrían que padecer las personas, especialmente las de los países de renta baja.

Toma de decisiones de adaptación y sobregiro

En contraste con la prominencia de las trayectorias de sobregiro en la literatura sobre mitigación, sus implicaciones para la planificación de la adaptación no han sido ampliamente exploradas⁴². Esto plantea la cuestión de si la posibilidad de revertir el impacto en un futuro a largo plazo es relevante para la planificación de la adaptación hoy en día, en comparación con la amenaza más inminente del cambio climático a corto plazo y la magnitud del pico de calentamiento⁴³.

Incluso en el supuesto optimista de una reversibilidad casi total de un conductor del impacto climático en situación de sobregiro, podría ser necesario un horizonte de planificación de 50 años o más antes de que las perspectivas de un declive a largo plazo empezaran a afectar a las decisiones de adaptación actuales o en un futuro inmediato (Fig. 5a). Pocos planes y políticas de adaptación operan en estas escalas temporales: por ejemplo, la Estrategia de Adaptación de la UE abarca tres décadas, mientras que otros planes nacionales de adaptación tienen horizontes temporales similares o más cortos⁴⁴. Los horizontes de planificación de la adaptación y la vida útil de las infraestructuras pueden diferir mucho (Fig. 5b). En el extremo largo de la escala de planificación, una presa hidroeléctrica puede funcionar durante un siglo o más, y sin embargo la gestión de esa presa (y si la gestión debe incluir el control de inundaciones como objetivo) se produciría en periodos de concesión (décadas), así como en ciclos presupuestarios anuales y subanuales (Fig. 5b).

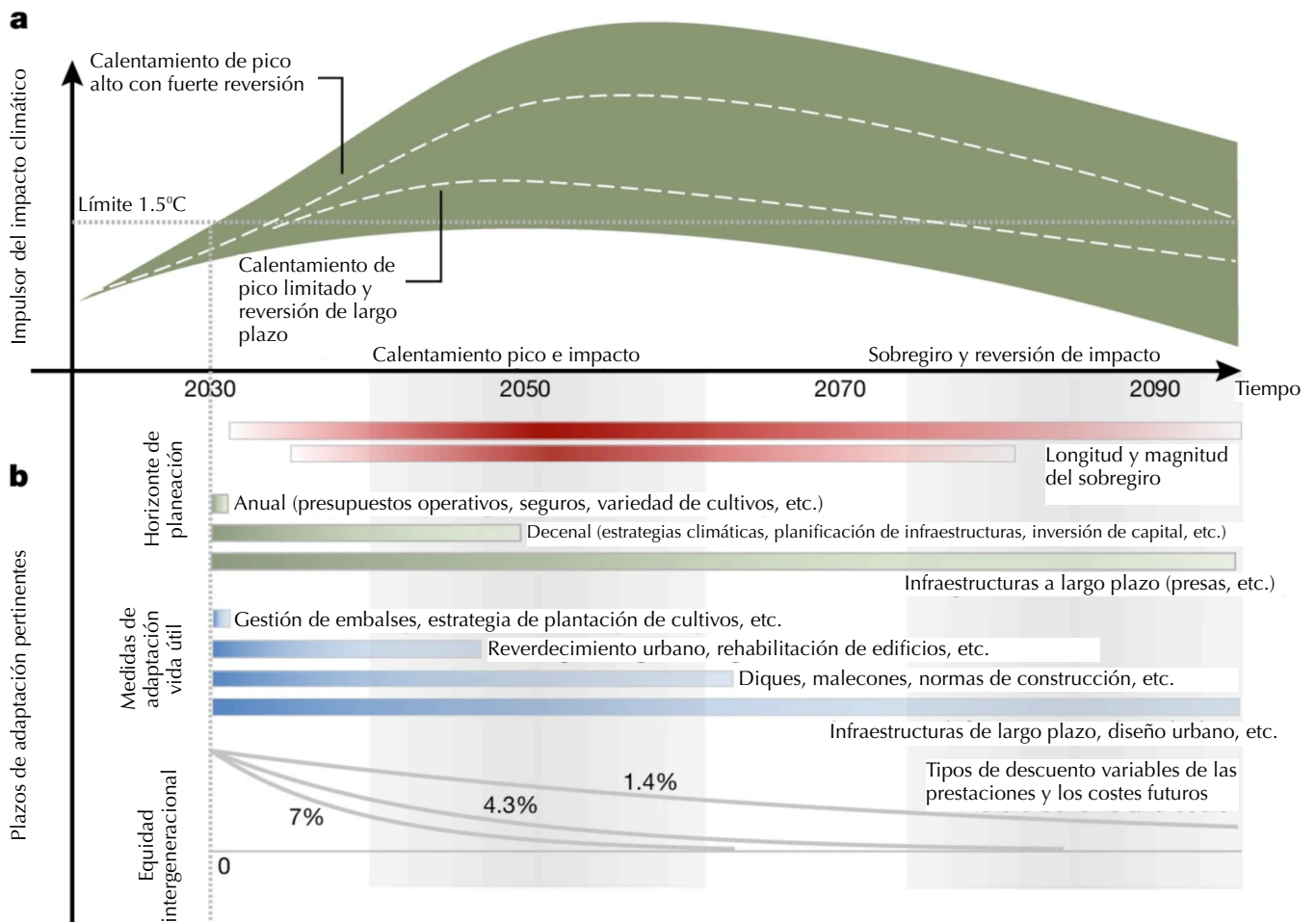
La aplicación de enfoques coste-beneficio en las medidas de adaptación, y la escala temporal en la que éstas se evalúan, requieren decisiones sobre la equidad intergeneracional que se reflejan en la elección de la tasa de descuento intertemporal⁴⁵. Las tasas de descuento más elevadas limitan el horizonte temporal relevante para la toma de decisiones económicas de adaptación a unas pocas décadas (Fig. 5b), en cuyo caso adaptarse a un pico de calentamiento podría ser siempre preferible a adaptarse a un resultado inferior a largo plazo.

Por lo tanto, parece que la reversibilidad del conductor del impacto a largo plazo tras el sobregiro puede ser relevante sólo en casos específicos de toma de decisiones de adaptación. Una excepción notable es la adaptación frente a impactos irreversibles con un desfase temporal, como la subida del nivel del mar, para la que los sobregiros afectarán a las perspectivas a largo plazo (Fig. 4). Sin embargo, como hemos demostrado anteriormente, no se puede confiar con certeza en un descenso de la temperatura global a largo plazo. Así pues, una estrategia de adaptación resiliente no puede basarse en apostar por el sobregiro, y sólo limitando los picos de calentamiento se pueden reducir eficazmente las necesidades de adaptación.

Los límites a la adaptación, tanto blandos como duros, restringen el espacio de opciones disponible para la adaptación³⁹. Esto incluye límites duros en los que, por ejemplo, la adaptación depende de medidas basadas en ecosistemas que a su vez se ven afectados negativamente por el cambio climático, así como límites blandos como la

falta de recursos o de sistemas de gobernanza³⁸. La transgresión de los límites duros de la adaptación, por ejemplo, mediante la destrucción de ecosistemas sensibles como resultado de un cambio climático desenfrenado, y los altos niveles máximos de calentamiento pueden hacer que estas medidas no estén disponibles en caso de revertirse el calentamiento en el futuro, reduciendo el conjunto disponible de medidas de adaptación en comparación con un caso sin sobregiro. El riesgo de transgredir los límites de adaptación, más que las perspectivas inciertas de reversibilidad a largo plazo, parece ser lo más importante a la hora de tomar decisiones de adaptación en caso de sobregiro.

Fig. 5: Escalas temporales y sobregiro relevantes para la adaptación



a, Evolución temporal estilizada de un conductor reversible del impacto climático en un escenario de pico y declive. Las líneas discontinuas indican un resultado de sobregiro bajo y alto con escalas de tiempo medias de reversibilidad del GMST que suelen coincidir con las de la base de datos AR6 del IPCC. b, Ilustración estilizada de escalas de tiempo relevantes para la adaptación a partir de 2030, incluidos diferentes horizontes de planificación para la adaptación y duraciones de las medidas de adaptación individuales (barras horizontales, ilustrativas de años a décadas⁵⁰, los marcos temporales reales varían mucho según el contexto), y el efecto de aplicar el descuento (que refleja las preferencias de la sociedad hacia la equidad intergeneracional) a los daños futuros y a los beneficios de la adaptación. Mostramos el efecto del descuento para tres tipos de descuento ilustrativos.

Reformular el debate sobre el sobregiro

En este artículo sostenemos que es engañoso plantear el sobregiro como una forma alternativa de conseguir un resultado climático similar. Demostramos que varios impactos climáticos en un mundo anterior y posterior al sobregiro son diferentes, lo que indica que la reversibilidad de los impactos no es un hecho. Incluso en los casos en que los impactos son reversibles, las escalas de tiempo para la reversibilidad pueden ser más largas que los horizontes de decisión típicos para la planificación de la adaptación, con impactos de calentamiento máximo (en contraposición a los impactos esperados a más largo plazo) que proporcionan el telón de fondo para las evaluaciones de las necesidades de adaptación global. Desde el punto de vista de la justicia climática, el sobregiro conlleva repercusiones socioeconómicas y pérdidas y daños relacionados con el clima que suelen ser irreversibles y recaen más gravemente sobre los pobres. Esta dimensión ética debe tenerse en cuenta explícitamente al evaluar las trayectorias de sobregiro y las posibilidades de limitar los riesgos de sobregiro mediante reducciones de emisiones a corto plazo.

Se ha argumentado que los impactos climáticos durante los sobregiros podrían reducirse o enmascarse mediante el despliegue de técnicas de intervención de geoingeniería solar (GE)⁴⁶ que enfriarían temporalmente el planeta. Esta idea se conoce como «peak-shaving». Sin embargo, estas propuestas se basan en hipótesis sobre la aplicabilidad, la eficacia y la gobernanza de las intervenciones de geoingeniería solar. Si se tienen en cuenta las incertidumbres en la respuesta física al cambio climático y en la evolución de las emisiones futuras una vez desplegado el GE, una intervención de este tipo destinada a reducir los picos y los sobregiros podría suponer un compromiso de varios siglos de despliegue tanto de GE como de EDC²³. Aparte de las preocupaciones fundamentales sobre el despliegue de los GE en general⁴⁷, el discurso de la reducción de los picos es propenso al mismo exceso de confianza en la reversibilidad y la eficacia que hemos conceptualizado en este artículo.

Una de las principales motivaciones para reducir la temperatura a largo plazo en los escenarios de máximos y mínimos es reducir los impactos climáticos. Hemos demostrado que este descenso de la temperatura sería eficaz para reducir la aparición de efectos retardados durante siglos, como la subida del nivel del mar y los cambios criosféricos. Las consecuencias de una subida del nivel del mar de varios metros a largo plazo afectarán a las regiones costeras de todo el mundo, por lo que es importante reducir las temperaturas globales para minimizar estos riesgos a largo plazo. Del mismo modo, la probabilidad de cruzar umbrales irreversibles puede seguir siendo considerable a largo plazo a menos que la temperatura media mundial se reduzca por debajo de 1 °C por encima de los niveles preindustriales³³.

Basándonos en estas ideas, abogamos por replantear el discurso científico y político sobre el sobregiro para centrarnos en minimizar los riesgos climáticos en las trayectorias de temperaturas máximas y mínimas (Tabla 1). Sacamos dos conclusiones generales:

En primer lugar, es necesario acelerar lo más posible la reducción de emisiones para frenar el aumento de la temperatura y reducir el calentamiento máximo. Seguir esta trayectoria de protección reforzada (Tabla 1) es la única estrategia sólida para, si no evitar, al menos minimizar, los riesgos climáticos de largo alcance durante el siglo XXI.

En segundo lugar, sugerimos que es necesario preparar una capacidad de EDC sostenible desde el punto de vista medioambiental para protegerse de los resultados de alto riesgo a largo plazo derivados de retroalimentaciones climáticas más fuertes de lo esperado. Consideramos que esta capacidad preventiva de EDC tendría que ser del orden de varios cientos de gigatoneladas de NNCE acumulada, una escala que podría ser prácticamente posible dentro de los límites sostenibles de despliegue de EDC⁹, dejando poco margen para el uso de EDC para compensar las emisiones

residuales más allá de los sectores difíciles de reducir. Esto subraya aún más la importancia de unas reducciones muy estrictas de las emisiones a corto plazo para limitar los riesgos a largo plazo. Aunque sostenemos que es necesario crear una capacidad de EDC preventiva para protegerse frente a un calentamiento elevado, esta misma capacidad de EDC podría desplegarse también, en caso de que no se materializara el calentamiento, para reducir las temperaturas a largo plazo y, por tanto, los riesgos climáticos.

La necesidad de una capacidad preventiva tiene implicaciones para el diseño de trayectorias rigurosas de reducción de emisiones a la luz de las restricciones que limitan el despliegue global de la EDC. Las trayectorias que se basan en grandes cantidades de EDC para alcanzar simplemente un nivel neto cero de CO₂ a menudo agotan o superan los límites de sostenibilidad¹⁵, dejando poco o ningún margen para corregir el rumbo en caso de que los resultados de calentamiento sean elevados. Por el contrario, las trayectorias que no planifican el desarrollo futuro de la EDC pueden fracasar a la hora de desarrollar las soluciones tecnológicas necesarias para establecer una capacidad de EDC preventiva, exponiendo así a las generaciones futuras y, en particular, a las comunidades más vulnerables a riesgos que podrían cubrirse, al menos en parte. La incorporación de la EDC preventiva en el diseño de la trayectoria requiere una reflexión más profunda, no sólo sobre los riesgos y el diseño de las políticas, sino también sobre la manera de asignar responsabilidades e incentivos a los distintos agentes para garantizar esta capacidad de EDC preventiva⁴⁸.

Como consecuencia de las reducciones de emisiones cada vez más tardías, existe una alta probabilidad de superar un calentamiento global de 1,5 °C, e incluso de 2 °C, con trayectorias de emisiones que reflejen las ambiciones políticas actuales¹. Aunque a largo plazo se consiga reducir la temperatura global por debajo de esos niveles, ese sobregiro tendrá consecuencias irreversibles. Sólo una reducción rigurosa e inmediata de las emisiones puede limitar eficazmente los riesgos climáticos.

Métodos

Disponibilidad de datos

Los datos del escenario PROVIDE v.1.2 utilizados para la Fig. 2 están disponibles en Zenodo⁶⁹ (<https://doi.org/10.5281/zenodo.6963586>). Los datos subyacentes a las simulaciones GFDL-ESM2M y NorESM2-LM incluidas en la Fig. 3 y en las Figs. 5 y 6 de Datos Ampliados están disponibles en Zenodo⁷⁰ (<https://doi.org/10.5281/zenodo.11091132> y <https://doi.org/10.11582/2022.00012>). Los datos necesarios para reproducir las Figs. 7 y 8 de Datos Ampliados están disponibles en <https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz/>. Los datos necesarios para reproducir la Fig. 4 y los Datos Ampliados de las Figs. 3, 4, 9 y 10 están incluidos en el repositorio de código.

Disponibilidad del código

El análisis se realizó con Python y las proyecciones espaciales se basan en el paquete cartopy. Los scripts para reproducir las Figs. 2-5 están disponibles en Zenodo⁷¹ (<https://doi.org/10.5281/zenodo.13208166>).

Referencias:

1. Rogelj, J. et al. Credibility gap in net-zero climate targets leaves world at high risk. *Science* 380, 1014–1016 (2023).
2. IPCC. Summary for policymakers. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Shukla, P. R. et al.) 1–48 (Cambridge Univ. Press, 2022).
3. Prütz, R., Strefler, J., Rogelj, J. & Fuss, S. Understanding the carbon dioxide removal range in 1.5°C compatible and high overshoot pathways. *Environ. Res. Commun.* 5, 041005 (2023).
4. Schwinger, J., Asaadi, A., Steinert, N. J. & Lee, H. Emit now, mitigate later? Earth system reversibility under overshoots of different magnitudes and durations. *Earth Syst. Dyn.* 13, 1641–1665 (2022).
5. Pfeleiderer, P., Schlessner, C.-F. & Sillmann, J. Limited reversal of regional climate signals in overshoot scenarios. *Environ. Res. Clim.* 3, 015005 (2024).
6. IPCC. Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Masson-Delmotte, V. et al.) 3–32 (Cambridge Univ. Press, 2021).
7. MacDougall, A. H. et al. Is there warming in the pipeline? A multi-model analysis of the zero emissions commitment from CO₂. *Biogeosciences* 17, 2987–3016 (2020).
8. Smith, S. et al. *The State of Carbon Dioxide Removal 1st edn* (MCC, 2023).
9. Deprez, A. et al. Sustainability limits needed for CO₂ removal. *Science* 383, 484–486 (2024).
10. Schneider, S. H. & Mastrandrea, M. D. Probabilistic assessment of “dangerous” climate change and emissions pathways. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 102, 15728–15735 (2005).
11. Wigley, T. M. L., Richels, R. & Edmonds, J. A. Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations. *Nature* 379, 240–243 (1996).
12. Azar, C., Johansson, D. J. A. & Mattsson, N. Meeting global temperature targets—the role of bioenergy with carbon capture and storage. *Environ. Res. Lett.* 8, 034004 (2013).
13. Schlessner, C.-F. et al. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nat. Clim. Change* 6, 827–835 (2016).
14. Rajamani, L. & Werksman, J. The legal character and operational relevance of the Paris Agreement’s temperature goal. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 376, 20160458 (2018).
15. Riahi, K. et al. Mitigation pathways compatible with long-term goals. In *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Shukla, P. R. et al.) 295–408 (Cambridge Univ. Press, 2022).
16. Rogelj, J. et al. A new scenario logic for the Paris Agreement long-term temperature goal. *Nature* 573, 357–363 (2019).
17. Schlessner, C.-F., Ganti, G., Rogelj, J. & Gidden, M. J. An emission pathway classification reflecting the Paris Agreement climate objectives. *Commun. Earth Environ.* 3, 135 (2022).
18. Forster, P. et al. The Earth’s energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* 923–1054 (Cambridge Univ. Press, 2023).
19. Palazzo Corner, S. et al. The Zero Emissions Commitment and climate stabilization. *Front. Sci.* 1, 1170744 (2023).
20. Grassi, G. et al. Harmonising the land-use flux estimates of global models and national inventories for 2000–2020. *Earth Syst. Sci. Data* 15, 1093–1114 (2023).
21. Meinshausen, M. et al. A perspective on the next generation of Earth system model scenarios: towards representative emission pathways (REPs). *Geosci. Model Dev.* 17, 4533–4559 (2024).
22. Zickfeld, K., Azevedo, D., Mathesius, S. & Matthews, H. D. Asymmetry in the climate– carbon cycle response to positive and negative CO₂ emissions. *Nat. Clim. Change* 11, 613–617 (2021).
23. Baur, S., Nauels, A., Nicholls, Z., Sanderson, B. M. & Schlessner, C.-F. The deployment length of solar radiation modification: an interplay of mitigation, net-negative emissions and climate uncertainty. *Earth Syst. Dyn.* 14, 367–381 (2023).
24. Canadell, J. G. et al. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* 673–816 (Cambridge Univ. Press, 2021).
25. McLaren, D., Willis, R., Szerszynski, B., Tyfield, D. & Markusson, N. Attractions of delay: using deliberative engagement to investigate the political and strategic impacts of greenhouse gas removal technologies. *Environ. Plan. E Nat. Space* 6, 578–599 (2023).
26. Powis, C. M., Smith, S. M., Minx, J. C. & Gasser, T. Quantifying global carbon dioxide removal deployment. *Environ. Res. Lett.* 18, 024022 (2023).
27. Lamb, W. F. et al. The carbon dioxide removal gap. *Nat. Clim. Change* 14, 644–651 (2024).
28. Prütz, R., Fuss, S., Lück, S., Stephan, L. & Rogelj, J. A taxonomy to map evidence on the co-benefits, challenges, and limits of carbon dioxide removal. *Commun. Earth Environ.* 5, 197 (2024).
29. Stuart-Smith, R. F., Rajamani, L., Rogelj, J. & Wetzler, T. Legal limits to the use of CO₂ removal. *Science* 382, 772–774 (2023).
30. King, A. D. et al. Preparing for a post-net-zero world. *Nat. Clim. Change* 12, 775–777 (2022).
31. Bellomo, K., Angeloni, M., Corti, S. & von Hardenberg, J. Future climate change shaped by inter-model differences in Atlantic meridional overturning circulation response. *Nat. Commun.* 12, 3659 (2021).
32. Schwinger, J., Asaadi, A., Goris, N. & Lee, H. Possibility for strong northern hemisphere high-latitude cooling under negative emissions. *Nat. Commun.* 13, 1095 (2022).
33. Möller, T. et al. Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks. *Nat. Commun.* 15, 6192 (2024).
34. Santana-Falcón, Y. et al. Irreversible loss in marine ecosystem habitability after a temperature overshoot. *Commun. Earth Environ.* 4, 343 (2023).
35. Schlessner, C.-F. et al. Crop productivity changes in 1.5°C and 2°C worlds under climate sensitivity uncertainty. *Environ. Res. Lett.* 13, 064007 (2018).
36. Meyer, A. L. S., Bentley, J., Odoulami, R. C., Pigot, A. L. & Trisos, C. H. Risks to biodiversity from temperature overshoot pathways. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 377, 20210394 (2022).
37. Mengel, M., Nauels, A., Rogelj, J. & Schlessner, C.-F. Committed sea-level rise under the Paris Agreement and the legacy of delayed mitigation action. *Nat. Commun.* 9, 601 (2018).
38. Andrijevic, M. et al. Towards scenario representation of adaptive capacity for global climate change assessments. *Nat. Clim. Change* 13, 778–787 (2023).

39. Thomas, A. et al. Global evidence of constraints and limits to human adaptation. *Reg. Environ. Change* 21, 85 (2021).
40. Birkmann, J. et al. Poverty, Livelihoods and Sustainable Development. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 1171–1274* (IPCC, 2022).
41. Burke, M., Hsiang, S. M. & Miguel, E. Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature* 527, 235–239 (2015).
42. Parry, M., Lowe, J. & Hanson, C. Overshoot, adapt and recover. *Nature* 458, 1102–1103 (2009).
43. Williams, J. W., Ordonez, A. & Svenning, J.-C. A unifying framework for studying and managing climate-driven rates of ecological change. *Nat. Ecol. Evol.* 5, 17–26 (2021).
44. UNFCCC. National Adaptation Plans 2021. Progress in the Formulation and Implementation of NAPs (UNFCCC, 2022).
45. 45. Caney, S. Climate change, intergenerational equity and the social discount rate. *Polit. Philos. Econ.* 13, 320–342 (2014).
46. MacMartin, D. G., Ricke, K. L. & Keith, D. W. Solar geoengineering as part of an overall strategy for meeting the 1.5 °C Paris target. *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 376, 20160454 (2018).
47. Biermann, F. et al. Solar geoengineering: the case for an international non-use agreement. *WIREs Clim. Change* 13, e754 (2022).
48. Fyson, C. L., Baur, S., Gidden, M. & Schlessner, C. Fair-share carbon dioxide removal increases major emitter responsibility. *Nat. Clim. Change* 10, 836–841 (2020).
49. Silvy, Y. et al. AERA-MIP: emission pathways, remaining budgets and carbon cycle dynamics compatible with 1.5 °C and 2 °C global warming stabilization. Preprint at <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-488> (2024).
50. Hallegatte, S. Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Glob. Environ. Change* 19, 240–247 (2009).
51. Lamboll, R., Rogelj, J. & Schlessner, C.-F. A guide to scenarios for the PROVIDE project. ESS Open Archive <https://doi.org/10.1002/essoar.10511875.2> (2022).
52. Luderer, G. et al. Impact of declining renewable energy costs on electrification in low-emission scenarios. *Nat. Energy* 7, 32–42 (2022).
53. Riahi, K. et al. Mitigation pathways compatible with long-term goals. in *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Shukla, P. R. et al.) (Cambridge Univ. Press, 2022).
54. Byers, E. et al. AR6 scenarios database. Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.5886912> (2022).
55. Smith, C. J. et al. FAIR v1.3: a simple emissions-based impulse response and carbon cycle model. *Geosci. Model Dev.* 11, 2273–2297 (2018).
56. Nicholls, Z. et al. Cross-Chapter Box 7.1: Physical emulation of Earth System Models for scenario classification and knowledge integration in AR6. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Masson-Delmotte, V. et al.) (Cambridge Univ. Press, 2021).
57. IPCC. Annex VII: Glossary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Matthews, J. B. R. et al.) 2215–2256 (Cambridge Univ. Press, 2021).
58. Sherwood, S. et al. An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Rev. Geophys.* 58, e2019RG000678 (2020).
59. Dunne, J. P. et al. GFDL's ESM2 Global Coupled Climate–Carbon Earth System Models. Part II: carbon system formulation and baseline simulation characteristics. *J. Clim.* 26, 2247–2267 (2013).
60. Burger, F. A., John, J. G. & Frölicher, T. L. Increase in ocean acidity variability and extremes under increasing atmospheric CO₂. *Biogeosciences* 17, 4633–4662 (2020).
61. Terhaar, J., Frölicher, T. L., Aschwanden, M. T., Friedlingstein, P. & Joos, F. Adaptive emission reduction approach to reach any global warming target. *Nat. Clim. Change* 12, 1136–1142 (2022).
62. Frölicher, T. L., Jens, T., Fortunat, J. & Yona, S. Protocol for Adaptive Emission Reduction Approach (AERA) simulations. Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.7473133> (2022).
63. Seland, Ø. et al. Overview of the Norwegian Earth System Model (NorESM2) and key climate response of CMIP6 DECK, historical, and scenario simulations. *Geosci. Model Dev.* 13, 6165–6200 (2020).
64. Jones, C. D. et al. The Zero Emissions Commitment Model Intercomparison Project (ZECMIP) contribution to C4MIP: quantifying committed climate changes following zero carbon emissions. *Geosci. Model Dev.* 12, 4375–4385 (2019).
65. De Hertog, S. J. et al. The biogeophysical effects of idealized land cover and land management changes in Earth system models. *Earth Syst. Dyn.* 14, 629–667 (2023).
66. O'Neill, B. C. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev. Discuss.* 9, 3461–3482 (2016).
67. Quilcaille, Y., Gasser, T., Ciais, P. & Boucher, O. CMIP6 simulations with the compact Earth system model OSCAR v3.1. *Geosci. Model Dev.* 16, 1129–1161 (2023).
68. Qiu, C. et al. A strong mitigation scenario maintains climate neutrality of northern peatlands. *One Earth* 5, 86–97 (2022).
69. Lamboll, R., Rogelj, J. & Schlessner, C.-F. Scenario emissions and temperature data for PROVIDE project (v.1.1.1). Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.6963586> (2022).
70. Lacroix, F., Burger, F., Silvy, Y., Schlessner, C.-F., & Frölicher, T. L. GFDL-ESM2M overshoot data. Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.11091132> (2024).
71. Schlessner, C.-F. et al. Accompanying scripts for Schlessner et al. Overconfidence in Climate Overshoot. Zenodo <https://doi.org/10.5281/zenodo.13208166> (2024).
72. Lane, J., Greig, C. & Garnett, A. Uncertain storage prospects create a conundrum for carbon capture and storage ambitions. *Nat. Clim. Change* 11, 925–936 (2021).
73. Fuss, S. et al. Negative emissions—part 2: costs, potentials and side effects. *Environ. Res. Lett.* 13, 063002 (2018).
74. Anderegg, W. R. L. et al. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science* 368, eaaz7005 (2020).
75. Heikkinen, J., Keskinen, R., Kostensalo, J. & Nuutinen, V. Climate change induces carbon loss of arable mineral soils in boreal conditions. *Glob. Change Biol.* 28, 3960–3973 (2022).
76. Chiquier, S., Patrizio, P., Bui, M., Sunny, N. & Dowell, N. M. A comparative analysis of the efficiency, timing, and permanence of CO₂ removal pathways. *Energy Environ. Sci.* 15, 4389–4403 (2022).
77. Mengis, N., Paul, A. & Fernández-Méndez, M. Counting (on) blue carbon—Challenges and ways forward for carbon accounting of ecosystem-based carbon removal in marine environments. *PLoS Clim.* 2, e0000148 (2023).
78. Jones, C. D. et al. Simulating the Earth system response to negative emissions. *Environ. Res. Lett.* 11, 095012 (2016).
79. Realmonte, G. et al. An inter-model assessment of the role of direct air capture in deep mitigation pathways. *Nat. Commun.* 10, 3277 (2019).
80. Krause, A. et al. Large uncertainty in carbon uptake potential of land-based climate-change mitigation efforts. *Glob. Change Biol.* 24, 3025–3038 (2018).
81. Minx, J. C. et al. Negative emissions—Part 1: research landscape and synthesis. *Environ. Res. Lett.* 13, 063001–063001 (2018).

82. Grant, N., Hawkes, A., Mittal, S. & Gambhir, A. Confronting mitigation deterrence in low-carbon scenarios. *Environ. Res. Lett.* 16, 64099–64099 (2021).
83. Carton, W., Hougaard, I.-M., Markusson, N. & Lund, J. F. Is carbon removal delaying emission reductions? *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* 14, e826 (2023).
84. Donnison, C. et al. Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS): finding the winwins for energy, negative emissions and ecosystem services—size matters. *Glob. Change Biol. Bioenergy* 12, 586–604 (2020).
85. Heck, V., Hoff, H., Wirsenius, S., Meyer, C. & Kreft, H. Land use options for staying within the Planetary Boundaries – Synergies and trade-offs between global and local sustainability goals. *Glob. Environ. Change* 49, 73–84 (2018).
86. Doelman, J. C. et al. Afforestation for climate change mitigation: potentials, risks and trade-offs. *Glob. Change Biol.* 26, 1576–1591 (2020).
87. Lee, K., Fyson, C. & Schleussner, C. F. Fair distributions of carbon dioxide removal obligations and implications for effective national net-zero targets. *Environ. Res. Lett.* 16, 094001 (2021).
88. Ganti, G. et al. Uncompensated claims to fair emission space risk putting Paris Agreement goals out of reach. *Environ. Res. Lett.* 18, 024040 (2023).
89. Yuwono, B. et al. Doing burden-sharing right to deliver natural climate solutions for carbon dioxide removal. *Nat. Based Solut.* 3, 100048 (2023).

Vínculos relacionados:

- La Alianza Global Jus Semper
 - Johan Rockström et al: [Identificando un Pasaje Seguro y Justo para las Personas y el Planeta](#)
 - Johan Rockström et al: [Los Límites Seguros y Justos del Sistema Tierra](#)
 - Will Steffen, Johan Rockström et al: [Trayectorias del Sistema Tierra en el Antropoceno](#)
 - Linn Persson et al: [Fuera del Espacio Operativo Seguro del Límite Planetario para Entidades Noveles](#)
 - Los Editores de Monthly Review: [Los Informes Filtrados del IPCC](#)
-

❖ **Agradecimientos:** Agradecemos el apoyo de los programas de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención nº 101003687 (PROVIDE). G.G. agradece el apoyo del Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) en virtud del acuerdo de subvención nº 01LS2108D (EDC PoEt). T.G. también agradece el apoyo de los programas de investigación e innovación Horizonte 2020 y Horizonte Europa de la Unión Europea en virtud de los acuerdos de subvención nº 773421 (Nunataryuk) y 101056939 (RESCUE). J.S. está financiado por la Fundación Alemana de Investigación (DFG) bajo la Estrategia de Excelencia de Alemania-EXC 2037:CLICCS-Climate, Climatic Change, and Society-project no. 390683824, contribución al Centro de Investigación del Sistema Tierra y Sostenibilidad (CEN) de la Universität Hamburg. Las simulaciones ESM2M del GFDL se realizaron en el Centro Nacional Suizo de Supercomputación. B.S. agradece el apoyo del Consejo de Investigación de Noruega en virtud del acuerdo de subvención nº 334811 (TRIFECTA).

❖ **Información de autor**

❖ **Jana Sillmann**

Dirección actual: Centre for International Climate and Environmental Research, Oslo, Norway

❖ **Autores y afiliaciones:**

❖ **International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria**

Carl-Friedrich Schleussner, Gaurav Ganti, Biqing Zhu, Thomas Gasser, Matthew J. Gidden, Malte Meinshausen, Zebedee Nicholls, Christopher J. Smith & Joeri Rogelj

❖ **Geography Department and IRITHESys Institute, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin, Germany**

Carl-Friedrich Schleussner, Gaurav Ganti, Quentin Lejeune, Ruben Prütz, Sabine Fuss, Rosanne Martyr & Emily Theokritoff

❖ **Climate Analytics, Berlin, Germany**

Carl-Friedrich Schleussner, Gaurav Ganti, Quentin Lejeune, Peter Pfleiderer, Matthew J. Gidden, Rosanne Martyr & Emily Theokritoff

❖ **Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE, Gif-sur-Yvette, France**

Biqing Zhu & Philippe Ciais

❖ **Research Unit for Sustainability and Climate Risks, University of Hamburg, Hamburg, Germany**

Peter Pfleiderer & Jana Sillmann

❖ **Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC), Berlin, Germany**

Ruben Prütz & Sabine Fuss

❖ **Grantham Institute for Climate Change and the Environment, Imperial College London, London, UK**

Ruben Prütz, Emily Theokritoff & Joeri Rogelj

❖ **Climate and Environmental Physics, Physics Institute, University of Bern, Bern, Switzerland**

Thomas L. Frölicher & Fabrice Lacroix

❖ **Oeschger Centre for Climate Change Research, University of Bern, Bern, Switzerland**

Thomas L. Frölicher & Fabrice Lacroix

❖ **Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam, Germany**

Sabine Fuss & Matthias Mengel

❖ **Department of Environmental Systems Science, ETH Zürich, Zürich, Switzerland**

Chahan M. Kropf, Jamie W. McCaughey, Yann Quilcaille & Sonia I. Seneviratne

❖ **Federal Office of Meteorology and Climatology, MeteoSwiss, Zürich, Switzerland**

Chahan M. Kropf & Jamie W. McCaughey

❖ **Institute of Geography, University of Bern, Bern, Switzerland**

Fabrice Lacroix

❖ **Centre for Environmental Policy, Imperial College London, London, UK**

Robin Lamboll & Joeri Rogelj

❖ **Department of Atmospheric and Cryospheric Sciences, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria**

Fabien Maussion

❖ **School of Geographical Sciences, University of Bristol, Bristol, UK**

Fabien Maussion

❖ **School of Geography, Earth and Atmospheric Sciences, The University of Melbourne, Melbourne, Victoria, Australia**

Malte Meinshausen & Zebedee Nicholls

❖ **Climate Resource, Melbourne, Victoria, Australia**

Malte Meinshausen & Zebedee Nicholls

❖ **Centre for International Climate and Environmental Research, Oslo, Norway**

Benjamin Sanderson & Norman J. Steinert

❖ **Met Office Hadley Centre, Exeter, UK**

Christopher J. Smith

❖ **School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds, UK**

Christopher J. Smith

❖ **Tyndall Centre for Climate Change Research and School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, UK**

Rachel Warren & Jeff Pric

- ❖ **Acerca de Jus Semper:** La Alianza Global Jus Semper aspira a contribuir a alcanzar un etos sostenible de justicia social en el mundo, donde todas las comunidades vivan en ámbitos verdaderamente democráticos que brinden el pleno disfrute de los derechos humanos y de normas de vida sostenibles conforme a la dignidad humana. Para ello, coadyuva a la liberalización de las instituciones democráticas de la sociedad que han sido secuestradas por los dueños del mercado. Con ese propósito, se dedica a la investigación y análisis para provocar la toma de conciencia y el pensamiento crítico que generen las ideas para la visión transformadora que dé forma al paradigma verdaderamente democrático y sostenible de la Gente y el Planeta y NO del mercado.
- ❖ **Autores:** Carl-Friedrich Schleussner, Gaurav Ganti, Quentin Lejeune, Biqing Zhu, Peter Pfeleiderer, Ruben Prütz, Philippe Ciais, Thomas L. Frölicher, Sabine Fuss, Thomas Gasser, Matthew J. Gidden, Chahan M. Kropf, Fabrice Lacroix, Robin Lamboll, Rosanne Martyr, Fabien Maussion, Jamie W. McCaughey, Malte Meinshausen, Matthias Mengel, Zebedee Nicholls, Yann Quilcaille, Benjamin Sanderson, Sonia I. Seneviratne, Jana Sillmann, Christopher J. Smith, Norman J. Steinert, Emily Theokritoff, Rachel Warren, Jeff Price & Joeri Rogelj
- ❖ **Acerca de este artículo:** Este trabajo fue publicado originalmente en inglés por Nature 634, páginas 366-373 (2024) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08020-9>. **Derechos y autorizaciones:** Este artículo está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional, que permite su uso, compartir, adaptar, distribuir y reproducir en cualquier medio o formato, siempre que se cite debidamente al autor o autores originales y la fuente, se proporcione un enlace a la licencia Creative Commons y se indique si se han realizado cambios. Las imágenes u otro material de terceros en este artículo están incluidos en la licencia Creative Commons del artículo, a menos que se indique lo contrario en una línea de crédito al material. Si el material no está incluido en la licencia Creative Commons del artículo y su uso previsto no está permitido por la normativa legal o excede el uso permitido, deberá obtener permiso directamente del titular de los derechos de autor. Para ver una copia de esta licencia, visite: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.
- ❖ **Contribuciones:** C.-F.S., Q.L. y J.R. concibieron el estudio. C.-F.S. diseñó el estudio y escribió el primer borrador con la mayoría de las contribuciones de Q.L., G.G. y J.R.; J.R. y C.-F.S. desarrollaron la clasificación de trayectorias y diseñaron la Fig. 1, la Tabla 1 y la Tabla 1 de Datos Ampliados con el apoyo de G.G. La sección de respuesta climática global, incluido el análisis subyacente a la Fig. 2 y a las Figs. 1 y 2 de Datos Ampliados, fue dirigida por G.G. y apoyada por Z.N., C.J.S., R.L., C.-F.S. y J.R. La sección sobre EDC, incluidos el Cuadro 2 de Datos Ampliados y la Fig. 3 de Datos Ampliados, fue dirigida por R.P. con el apoyo de S.F., C.-F.S., M.J.G. y J.R. La sección sobre reversibilidad del cambio climático, incluyendo la Fig. 3 y las Figs. 4-8 de Datos Ampliados, fue dirigida por P.P. con el apoyo de N.J.S., T.L.F., F.L., B.S. y C.-F.S.; F.L. llevó a cabo las simulaciones de sobregiro y estabilización del GFDL ESM2M con el apoyo de T.L.F. El análisis subyacente a la sección sobre los impactos diferidos fue dirigido por B.Z., con el apoyo de M. Mengel, T.G. y P.C., y con aportaciones de R.W., J.P., F.M. y C.-F.S. La sección sobre la toma de decisiones de adaptación fue dirigida por C.M.K., J.W.M., E.T. y R.M. con aportaciones de J.S. y C.-F.S.; S.I.S., Y.Q. y M. Meinshausen aportaron ideas sobre la conceptualización de todo el artículo. Todos los autores contribuyeron a la redacción del documento. **Autor de correspondencia:** Correspondencia a [Carl-Friedrich Schleussner](mailto:Carl-Friedrich.Schleussner).
- ❖ **Declaraciones éticas: Intereses en conflicto.** Los autores declaran no tener intereses en conflicto. **Información sobre la revisión por pares:** Nature agradece a Amy Luers, Nadine Mengis y al resto de revisores anónimos su contribución a la revisión por pares de este trabajo. Los informes de los revisores están disponibles. **Información adicional:** Nota del editor Springer Nature se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales. **Gráficos y tablas de datos ampliados.** **Información suplementaria:** [Peer Review file](#)
- ❖ **Cite este trabajo como:** Carl-Friedrich Schleussner et al: Exceso de confianza en el sobregiro climático — La Alianza Global Jus Semper Global Alliance, marzo 2025.
- ❖ **Etiquetas:** capitalismo, democracia, Sistema Tierra, calentamiento global, cambio climático, sobregiro, sostenibilidad, consumo, puntos de inflexión.
- ❖ La responsabilidad de las opiniones expresadas en este trabajo corresponde exclusivamente a su(s) autor(es), y su publicación no constituye necesariamente un respaldo de La Alianza Global Jus Semper.



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

© 2025. La Alianza Global Jus Semper
Portal en red: https://www.jussemper.org/Inicio/Index_castellano.html
Correo-e: informa@jussemper.org