

Cambio climático

Bases científicas y cuestiones a debate



Coordinador
Julio Lumbreras

Prólogo del profesor de la Universidad de Harvard
Daniel P. Schrag

Autores

Rafael Borge – Kirsten Dunlop – Dieter Gerten – Howard J. Herzog – Rubén Juanes
Asunción Lera St-Claire – Pedro Linares – Iñigo J. Losada – Julio Lumbreras – José Manuel Moreno

Cambio climático

Bases científicas y cuestiones a debate

Edita
Fundación Naturgy
Avda. San Luís, 77
28033 Madrid

www.fundacionnaturgy.org

2ª edición
© 2020 Fundación Naturgy

ISBN: 978-84-09-22612-2
Depósito legal: M-27587-2020

Impreso en España

Adaptación comunicativa: Antoni París
Diseño y maquetación: Joan Jubany y Xevi Riera

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización por escrito de la Fundación Naturgy.



Este libro se ha impreso utilizando papel estucado de 125 gramos con certificación forestal PEFC de la Asociación Española para la Sostenibilidad Forestal.

Contenidos

Prólogo	5
Prof. Daniel P. Schrag, profesor y director del Centro para el Medio Ambiente de la Universidad de Harvard.	
Resumen ejecutivo	10
1. Las bases científicas del cambio climático	15
1.1 El contexto	17
1.2 Las instituciones científicas	21
Dr. Julio Lumbleras, profesor titular Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y <i>visiting scientist</i> en la Universidad de Harvard.	
Dr. Pedro Linares, catedrático del Departamento de Organización Industrial de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI.	
Dr. Iñigo J. Losada, profesor y director de Investigación de IHCantabria.	
2. Las grandes cuestiones en torno al cambio climático	29
2.1 ¿Se está acentuando el efecto invernadero? ¿Lo estamos sufriendo ya?	31
Dr. José Manuel Moreno, catedrático de Ecología en la Universidad de Castilla-La Mancha y antiguo Vice-Chair WG2-IPCC.	
2.2 ¿Cuál es la contribución antropogénica al cambio climático y la superación de otros límites planetarios?	45
Prof. Dieter Gerten, profesor de Hidrología y Climatología del Cambio Global en la Humboldt-Universität zu Berlin.	
2.3 ¿Cuáles son las grandes incertidumbres en la medición y predicción?	53
Dr. Rafael Borge, director del Laboratorio de Modelización Ambiental en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UPM.	
2.4 ¿Podemos y debemos adaptarnos al cambio climático?	63
Dra. Asunción Lera St-Claire, miembro del EC Mission Board on Climate Change Adaptation.	
2.5 ¿La mitigación del cambio climático va a transformar nuestro modelo socioeconómico?	71
Dr. Kirsten Dunlop, CEO Climate-KIC.	
2.6 ¿Es necesario capturar y almacenar el CO ₂ ?	81
Dr. Rubén Juanes, profesor del MIT y director del Laboratorio Henry L. Pierce para la Ciencia y la Ingeniería de las Infraestructuras.	
Dr. Howard J. Herzog, ingeniero investigador principal de la MIT Energy Initiative.	
Glosario	89

Prólogo

Daniel P. Schrag

Profesor y director del Centro para el Medio Ambiente de la Universidad de Harvard

El cambio climático puede ser el problema más difícil al que jamás se ha haya enfrentado la humanidad, por dos sencillas razones. Primero, porque se trata de una acción colectiva a escala global, ya que la atmósfera toma nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente de la quema de combustibles fósiles, y las mezcla por todo el hemisferio en que se emitieron en un periodo de unas semanas, y en los dos hemisferios en unos pocos años. Esto significa que las emisiones provenientes de los EEUU afectan al conjunto del planeta Tierra, incluidas todas las personas, animales y plantas. Y resulta que los humanos no somos demasiado buenos a la hora de resolver problemas que exigen acción colectiva. Somos más bien tribales y tendemos a actuar para apoyar a nuestros amigos y en contra de nuestros enemigos. Pero el cambio climático requiere una escala de cooperación global rara vez vista en la historia del mundo. Incluso durante las grandes guerras mundiales del siglo XX, cuando la gente de ambos lados del conflicto hizo sacrificios extraordinarios, hubo bandos. La gente apoyaba a los amigos en contra de los enemigos. Para el cambio climático, sin embargo, no hay enemigo, o para citar a Walt Kelly, “hemos visto al enemigo y somos nosotros”.

El segundo aspecto del cambio climático que lo convierte en un gran desafío para la humanidad tiene que ver con la duración de sus efectos. Muchos de los componentes del sistema climático actúan en escalas de tiempo muy largas, desde varias décadas hasta decenas de milenios. Y puede que los seres humanos, y especialmente las organizaciones humanas, seamos incluso peores a la hora de trabajar con escalas de tiempo tan largas de lo que somos a la hora de resolver problemas a través de la acción colectiva global. La pandemia de la Covid-19 ilustra lo mal que administramos incluso los sistemas en los que transcurre un intervalo de tiempo de entre cuatro y diez semanas, desde un aumento en los casos a un aumento en la mortalidad. Con el cambio climático ya estamos sintiendo los impactos, desde el incremento en el nivel del mar y el aumento de las olas de calor, hasta las tormentas extremas y el derretimiento de los glaciares de las montañas; y aunque tomemos medidas inmediatamente, estamos destinados a experimentar un calentamiento continuo durante décadas o siglos.

Para comprender los periodos tan largos implicados en el sistema climático podemos considerar primero el ciclo del carbono, ya que los niveles elevados del dióxido de carbono en la atmósfera son la causa principal del cambio climático. De las casi 40 mil millones de toneladas que emitimos cada año por la quema de combustibles fósiles, los océanos absorben aproximadamente el 25 %, lo que nos proporciona cierto grado de protección contra nuestras propias acciones. Esa tasa de absorción está limitada no por el intercambio químico con la atmósfera, que ocurre por toda la superficie del mar con relativa rapidez, sino por la mezcla de la superficie del océano con el agua a mayores profundidades. Es imposible acelerar ese

efecto de mezcla, ya que es impulsado por la rotación de la Tierra y por las mareas causadas por la Luna y otros planetas. A lo largo de los próximos miles de años, este efecto de mezcla en los océanos absorberá la mayor parte del CO₂ que los humanos hemos producido a partir de combustibles fósiles. Pero lo que quede, aproximadamente el 20 % de lo que hay en el aire, permanecerá allí durante miles de años. En otras palabras, las decisiones sobre energía que tomemos hoy afectarán la composición de la atmósfera terrestre a muy largo plazo, obligando a cientos de generaciones futuras a adaptarse a cambios climáticos que hemos iniciado nosotros.

Hay muchos otros procesos dentro del sistema climático que actúan en escalas de tiempo largas. De toda la energía solar atrapada en la Tierra por los gases de efecto invernadero, más del 90 % acaba calentando los océanos, y esto se modula gracias a procesos de mezcla que tienen lugar durante siglos o milenios. De hecho, se puede pensar en los océanos como una vasta reserva de refrigerante que ayuda a frenar el cambio climático. Esta absorción de calor por los océanos modera los impactos del cambio en la superficie terrestre, pero solo nos da algo más de tiempo. Durante los próximos cientos de años, las temperaturas en el tercio superior de los océanos aumentarán lentamente, y esto provocará un calentamiento adicional de dicha superficie, incluso si los niveles de CO₂ atmosférico ya no aumentan más. Esto es bueno y malo. Es bueno que la absorción de calor por parte de los océanos ralentice la respuesta climática, ya que nos da más tiempo para adaptarnos a los cambios. Pero es malo porque significa que, incluso después de estabilizar el nivel de CO₂ en la atmósfera (es decir, cuando hayamos reducido nuestras emisiones lo suficiente para que los sumideros naturales las equilibren), la superficie de la Tierra seguirá calentándose durante siglos, dejando a las generaciones futuras la obligación de gestionar las consecuencias ambientales de nuestras decisiones energéticas.

También hay muchos periodos de tiempo relacionados con el sistema climático que son inciertos, como la escala de tiempo para la desaparición de las capas de hielo en Groenlandia y la Antártida. Estas capas de hielo son una parte muy importante del balance hidrológico superficial de la Tierra: la capa de Groenlandia contiene el equivalente a más de siete metros de nivel del mar, mientras que las capas de la Antártida Occidental contienen aproximadamente el equivalente a seis metros, y el enorme terreno de la Antártida Oriental almacena lo equivalente a más de 50 metros de nivel del mar. Incluso hoy, probablemente hayamos superado el punto de no retorno para Groenlandia, y quizás para partes de la Antártida Occidental. Cada verano, se derrite más hielo en la parte superior de la capa de Groenlandia del que es reemplazado por la nieve del invierno, y este proceso se acelerará a medida que la elevación de dicha capa disminuya y las temperaturas aumenten. En la Antártida, el problema no es tanto el derretimiento, sino la desintegración de las plataformas de hielo que actualmente impiden que los glaciares fluyan hacia el océano impulsados por su calentamiento. Es posible que algunos sistemas, como el glaciar Thwaites, ya estén camino del colapso, resultando en varios metros de aumento del nivel del mar en el futuro. Y simplemente no sabemos con qué velocidad desaparecerán estas enormes capas de hielo. La disgregación de las de Groenlandia y la Antártida occidental podría alargarse durante cientos o miles de años. Si dura mil años, entonces el aumento del nivel del mar podría seguir siendo relativamente modesto para las generaciones futuras. Si son solo unos cientos de años, el impacto que causará en la civilización humana, gran parte de la cual se desarrolla cerca de las costas, es inimaginable. Una cosa es cierta: dure lo que dure el proceso de derretirse o deslizarse hacia el océano de estas capas de hielo, tardarán mucho, muchísimo más tiempo en volver a aumentar a base de la lenta acumulación de nieve en los glaciares durante decenas de miles de años. Esto resalta la irreversibilidad del cambio climático, por lo menos en las escalas temporales relevantes para las sociedades humanas.

Otra escala de tiempo crítica para el cambio climático es la necesaria para construir los nuevos sistemas energéticos sin emisiones de gases de efecto invernadero. A diferencia de algunas revoluciones tecnológicas, como las telecomunicaciones o la tecnología de la información, la creación de nuevos sistemas de energía requiere la construcción de infraestructuras masivas, que necesitan enormes cantidades de cemento y acero. Además, es de suponer que un nuevo sistema energético no fósil, probablemente basado en energías eólica y solar, requerirá la construcción de más infraestructura que la actual, debido a la intermitencia de los recursos renovables. Incluso con el notable progreso que hemos visto en la reducción de los costes de la energía renovable, debemos admitir que es muy probable que la eliminación de los combustibles fósiles de nuestro sistema energético requiera una innovación tecnológica mucho más allá de la capacidad de los sistemas energéticos actuales. Los sistemas basados en recursos no fósiles, que utilicen desde coches eléctricos hasta aviones de hidrógeno, deben ser mucho, pero mucho más baratos para competir con los combustibles fósiles. Y esto requiere tiempo para la investigación, el desarrollo, la demostración y, en última instancia, la implementación.

¿Cuáles son las lecciones que debemos aprender de estas largas escalas de tiempo del ciclo del carbono, del sistema climático y de los sistemas energéticos? Creo que es esencial que todos comprendamos la magnitud del desafío que afrontamos, y esto significa comprender los problemas que relacionan la acción colectiva y los plazos largos. La Tierra continuará calentándose mientras los humanos sigan emitiendo dióxido de carbono procedente de combustibles fósiles, y esto puede ser durante más tiempo de lo que prevemos. Al trabajar en una solución al cambio climático, debemos aceptar que cualquier “solución” será parcial e incompleta. Cierta grado de cambio climático, tal vez bastante, es inevitable. Ante tal situación (y en particular teniendo en cuenta los periodos de tiempo tan extendidos), algunas personas argumentan que no sirve de nada intentar reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y deberíamos centrar todos nuestros esfuerzos en prepararnos para las consecuencias del cambio climático, tratando de evitar los impactos, o al menos hacerlos menos costosos. El punto débil de este argumento es que prepararse para el cambio climático es cada vez más difícil, y en última instancia imposible, si no eliminamos las emisiones de gases de efecto invernadero y aseguramos que el problema no empeora.

Si no hacemos caso al problema, entonces las escalas de tiempo tan largas a considerar en el sistema del clima y del carbono, junto con la posibilidad de fuertes retroalimentaciones positivas (procesos que generan más cambio climático y que pueden ocurrir si no se toman medidas de mitigación), se vuelven simplemente demasiado poderosas para permitir cualquier adaptación significativa. No obstante, esto no significa que podamos simplemente centrarnos en reducir las emisiones. Las escalas temporales tan extendidas significan que los efectos del cambio climático que estamos experimentando hoy en día continuarán empeorando por lo menos durante muchas décadas. Comunidades de todo el mundo deben prepararse para los cambios que se avecinan, ya que la falta de preparación conducirá a un sufrimiento y trastornos masivos, y eso también tendrá un impacto global.

En este libro, los autores abordan muchos de los problemas más críticos asociados con el cambio climático, desde la ciencia elemental del problema hasta preguntas sobre la adaptación y las respuestas socioeconómicas a los impactos climáticos. Los textos que encontramos en el documento ayudan a concienciar sobre la complejidad del problema, incluyendo las muchas cosas que no sabemos, pero también la sencillez de las que sí sabemos. Enfrentar el desafío climático requerirá una escala de cooperación y compromiso global nunca visto en la historia de la humanidad. Esto solo sucederá si el público es consciente del problema y comprende las soluciones. Estos escritos ofrecen un paso en esa dirección, ya que construir una base de conciencia pública es esencial para el camino que nos queda por delante.

Resumen ejecutivo

Este libro aborda las **principales preguntas que se hace la ciencia en torno al cambio climático**, entendido como los cambios en el estado del clima que persisten durante periodos largos de tiempo (típicamente décadas o periodos más largos) y pueden identificarse, a través de alteraciones en los valores promedio y/o en la variabilidad de sus propiedades.

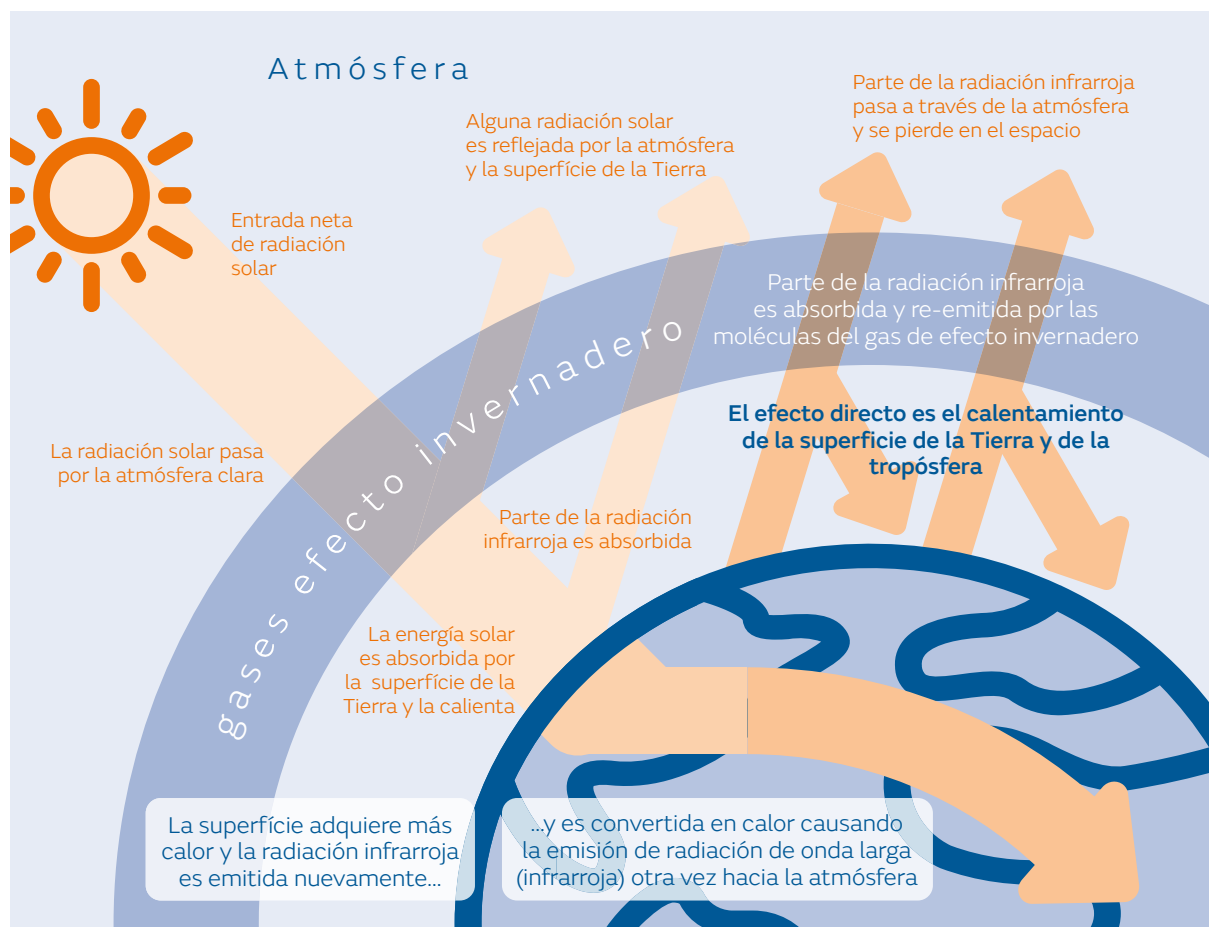
El primer capítulo aborda los principales conceptos necesarios para entender el cambio climático. También muestra la influencia humana en el mismo, los principales impactos ya evidenciados y resume el avance científico a lo largo de la historia. Por otro lado, explica el funcionamiento del principal **órgano internacional para la evaluación del cambio climático, denominado IPCC** (acrónimo del inglés *Intergovernmental Panel on Climate Change*), que es la organización científica más rigurosa en el ámbito sometida al escrutinio de evaluadores y gobiernos de más de 190 países. El IPCC produce informes periódicos que incluyen los resultados científicos de todos los grupos de investigación a nivel global, considerando tanto los trabajos que demuestran la influencia antropogénica en el clima, como los que rechazan esta hipótesis, siempre que estén validados científicamente. Después de un minucioso proceso de elaboración, consulta y examen, se aprueban los documentos que constituyen la principal fuente de información mundial de evidencia científica en torno al clima. Por su carácter científico e intergubernamental, el IPCC es una fuente excepcional de información científica rigurosa y equilibrada para los tomadores de decisiones. Al asumir los contenidos de los informes del IPCC, los gobiernos reconocen la autoridad de su contenido científico. Por último,

se mencionan otros grupos minoritarios que mantienen posiciones contrarias a **la evidencia científica mayoritaria que afirma como cierta la existencia del cambio climático y sus impactos asociados. Donde hay mayor grado de variación en la posición científica es respecto a la magnitud y la tipología de las acciones a emprender contra el cambio climático** y tendremos en los próximos años que avanzar en la búsqueda de un consenso que aborde este problema acuciante y global.

En el segundo capítulo, siete de los científicos más reputados internacionalmente responden a las dudas más recientes sobre diversos aspectos del cambio climático, basándose en el estado actual de la ciencia. De sus aportaciones, podríamos concluir lo siguiente:

1.- El cambio climático y sus impactos asociados son una certeza. Es particularmente claro el aumento de la frecuencia en los eventos extremos (olas de frío y calor, inundaciones, sequías, tormentas y huracanes, principalmente). También hay gran evidencia científica sobre la disminución de los hielos glaciares, que juegan un papel crucial en el clima, así como el aumento de la temperatura, la acidificación e hipoxia (pérdida de oxígeno) de los océanos. Además, hay un consenso generalizado en atribuir a la influencia humana el calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX. Todos estos efectos no sólo se producen sobre los sistemas naturales, sino también están teniendo consecuencias socioeconómicas como la bajada de productividad de los cultivos y de las especies marinas o el aumento de la mortalidad asociada a las olas de calor.

Figura 1 • ¿Qué es el efecto invernadero?



Fuente: Elaboración propia

2.- Aunque **el cambio climático** es quizá el principal riesgo al que se enfrenta la humanidad, **es uno de los nueve límites planetarios que se consideran críticos para la vida humana en la Tierra**. Estos límites se refieren a nueve procesos ambientales que, conjuntamente, regulan el funcionamiento y la estabilidad del sistema planetario (agotamiento de la capa de ozono estratosférico, pérdida de la integridad de la biosfera, contaminación química, acidificación oceánica, ciclo hidro-geológico global, cambio del sistema de las tierras, flujo de nutrientes (nitrógeno y fósforo), y carga de aerosoles atmosféricos, además del cambio climático). La causa principal de la transgresión de los límites planetarios es la agricultura y, en particular, la industrial e intensiva en recursos. Este sistema planetario es complejo y está muy interrelacionado, lo que conlleva la necesidad de desarrollar un conocimiento holístico, así como entender mejor sus dinámicas y, específicamente, la interrelación

del sistema climático con la biosfera terrestre, el ciclo del agua, los océanos y las masas de hielo a través de los numerosos procesos y retroalimentaciones que pueden amplificar el calentamiento global.

3.- **Nuestro conocimiento del sistema climático dista mucho de ser perfecto, pero** la evidencia proporcionada por los datos y modelos actuales indica que **el calentamiento del sistema climático es inequívoco** y que, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados carecen de precedentes en los últimos decenios a milenios. Otras facetas del cambio climático son más inciertas y, por ese motivo, los informes del IPCC incluyen el grado de incertidumbre asociado a cada afirmación, para facilitar la toma de decisiones con información precisa. Es necesario, por tanto, seguir investigando para cubrir los huecos en el conocimiento y para mejorar aún más nuestras capacidades, especialmente, en el ámbito de la medición y la modelización. En

los últimos años se están desarrollando nuevos conceptos y marcos teóricos para conciliar la respuesta de los modelos con las observaciones en algunas áreas críticas como las interacciones entre aerosoles y nubes o la cuantificación de ajustes rápidos del sistema climático. Además de un mejor conocimiento científico de los procesos relevantes, nuevas técnicas de análisis estadístico pueden ayudar a reducir incertidumbres que perduran en la historia de las simulaciones climáticas. También pueden contribuir a este objetivo metodologías novedosas para adaptar los resultados de estas simulaciones en el contexto de aplicaciones específicas.

4.- A pesar de todas las incertidumbres que tenemos en el presente, recientes estudios demuestran que **los objetivos del Acuerdo de París aún son técnicamente viables, además de económicamente favorables** puesto que existen numerosos co-beneficios asociados a un futuro descarbonizado.

5.- Sin embargo, no basta con plantear objetivos de reducción de emisiones (mitigación). Parte del cambio climático parece inexorable y **es necesario desarrollar estrategias de adaptación a los previsibles e inevitables impactos**. Se entiende por adaptación el proceso de ajuste a los impactos esperados moderando o evitando los daños o incluso explotando las oportunidades beneficiosas. Algunos ejemplos son la construcción de diques para evitar el aumento del nivel del mar o el uso de cultivos resistentes a las sequías. Sin embargo, también se reconoce que existen límites a la adaptación cuando no se puede prevenir a los individuos de riesgos que se consideran intolerables. Ante estos límites se plantean soluciones como las migraciones o adaptaciones “transformacionales”, modificando los procesos a una velocidad y escala superiores a las soluciones incrementales. Estas transformaciones sociales tienen que producirse tanto a escala global como local, cambiando nuestros hábitos vitales y centrándose en buscar procesos no lineales que generen la adaptación del sistema y que conlleven múltiples co-beneficios (como las soluciones basadas en la naturaleza mencionadas en el capítulo 2). Y estas transformaciones han de tener a las personas y las sociedades en el centro: son la principal causa del cambio climático y la principal solución.

6.- La perspectiva temporal es muy relevante para la adaptación y sus límites. Hay certeza científica de que el calentamiento global persistirá durante milenios y generará cambios adicionales en el sistema climático, salvo que se produzcan emisiones negativas de gases de efecto invernadero (absorciones), puesto que una vez emitidas, las moléculas de CO₂ y otros GEI se “almacenan” en la atmósfera entrando a formar parte del ciclo del carbono. Por tanto, **la adaptación** no sólo tendrá que mantenerse durante un tiempo largo, sino que probablemente **tendrá que constituir una nueva normalidad en las vidas de las futuras generaciones**.

7.- Una de las alternativas para reducir la concentración de GEI en la atmósfera e incluso revertir los niveles a valores precedentes es la captura y almacenamiento de CO₂ (CCS, según sus siglas en inglés: *Carbon Capture and Sequestration*). Esta solución tecnológica consiste en la absorción del CO₂ de un efluente gaseoso industrial o de la atmósfera, su transporte y posterior almacenamiento a largo plazo, siendo la estrategia actual más consolidada la inyección del CO₂ como fluido supercrítico en formaciones geológicas profundas. La absorción industrial suele realizarse mediante una operación denominada “lavado químico”, donde se usan sustancias absorbentes, fundamentalmente aminas. **La absorción de CO₂ atmosférico que podría dar lugar a “emisiones negativas”** se está planteando por dos vías: a) la captura directa del aire (proceso aún costoso y poco eficiente) y b) su transferencia, a través de la fotosíntesis, a biomasa que después se quema en centrales térmicas para producir electricidad, y el CO₂ se separa del efluente gaseoso con métodos industriales, dando lugar a una reducción neta de la concentración en la atmósfera. Actualmente, hay en operación instalaciones de CCS que almacenan 30 millones de toneladas de CO₂ al año, lo que sólo constituye el 0,075 % de la generación mundial. Dado el **gran coste de estas tecnologías**, su futuro dependerá del desarrollo de políticas específicas para su implementación o de políticas generales, como un impuesto al carbono.

8.- Además hay que ser conscientes de la **naturaleza sistémica y compleja del reto**, esto es, el cambio climático es un problema que afecta a un conjunto de componentes que están conectados entre sí, con múltiples interacciones y que operan de forma conjunta. Ante esta situación, las soluciones lineales y mecanicistas no son suficientes, no podemos aceptar y perpetuar las causas profundas de la emisión de gases de efecto invernadero y no podemos considerar el cambio climático como un problema exógeno, evitando cambios internos en nuestra sociedad. Es necesario plantear soluciones sistémicas: considerando las ciudades en su conjunto, las cadenas de valor industriales, las economías agrícolas de forma regional y los mercados de capital y sistemas financieros como problemas climáticos complejos.

9.- En este sentido, la humanidad ha desarrollado **grandes avances tecnológicos en la mitigación de emisiones** de algunos sectores como la generación de energía, hasta el punto de haber implementado sistemas de generación eléctrica 100 % renovables en algunos lugares del mundo. Sin embargo, esto no es suficiente porque la transformación necesaria es mucho más amplia y conlleva la necesidad de cambios de comportamiento y modificaciones en los sistemas completos.

10.- Todo lo anterior corrobora la **necesidad de pasar de cambios incrementales** (que en sí mismos son positivos para reducir el cambio climático, pero no suficientes) **a cambios transformacionales**, sistémicos, que abordan el problema en profundidad y producen cambios a la velocidad y escala necesarios para no comprometer la vida humana en la Tierra para las futuras generaciones. Esto es, una transformación fundamental de los sistemas económicos, sociales y financieros que desencadenen cambios exponenciales en las tasas de descarbonización y en las estrategias de adaptación. Para ello, es necesario generar mutaciones rápidas y de gran escala en los elementos constitutivos del sistema, que induzcan discontinuidades espaciales y temporales. Y esto sólo se puede hacer con innovación, más aún, con innovación sistémica, es decir, no sólo innovación tecnológica sino también social, política, económica, financiera e institucional afectando al sistema en su conjunto.

11.- **El cambio transformacional se concreta en tres cambios de paradigma:**

- **utilizar aproximaciones sistémicas**, lo que conlleva diseñar e implementar carteras (portafolios) de proyectos que se implementan de forma simultánea y están conectados y alineados de forma que se constituyen en palancas de descarbonización, catalizando cambios sociales, políticos y culturales (en contraposición con la implementación de soluciones disciplinares, aisladas, fragmentadas y organizadas en silos);
- **basar el sistema en la economía ecológica**, midiendo el éxito a través de la contribución social y ecológica, facilitando la transición hacia la sostenibilidad conforme al acuerdo universal de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y gestionando una evolución cultural de la sociedad humana hacia formas de gobernanza y comunidad más ajustadas a la concepción del mundo como un ecosistema;
- **y reformular la identidad humana**, evolucionando de una concepción antropocéntrica del mundo donde el ser humano tiene el derecho a dominar la naturaleza, utilizar los recursos naturales y la vida del resto de especies para soportar la vida humana y la expansión de sus ambiciones, a una visión de interdependencia, donde todas las especies dependen unas de otras y es imprescindible el cuidado del ecosistema para preservar la vida humana, desarrollando nuevos modos de vida y de ser.

12.- **Ni solos ni en silos.** La complejidad del problema, unido a la naturaleza global y a la urgencia de acción lleva a concluir que sólo se puede producir este cambio transformacional a través de **colaboraciones profundas y continuadas entre los distintos actores**: empresas, centros de investigación y universidades, gobiernos y sociedad civil. Además, el trabajo ha de ser **interdisciplinar**, es decir, de colaboración entre distintas disciplinas con perspectivas diversas estudiando los problemas de forma integral, holística. Así cada actor de cada disciplina aporta sus capacidades y valor diferencial, con el objetivo común de desarrollar un nuevo modelo económico ecológico y adaptado profundamente a las variaciones en el clima, que ya se están produciendo y se espera sean más intensas y extensas en las próximas décadas.



1.

Las bases científicas
del cambio climático



Julio Lumbreras

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y Máster en Gestión Pública por la Universidad de Harvard (EE.UU.). Es Profesor en la Universidad Politécnica de Madrid y Visiting Scientist en la Escuela de Salud Pública la Universidad de Harvard. Ha trabajado en decenas de proyectos de investigación relacionados con la calidad del aire y el cambio climático, fundamentalmente en el ámbito urbano. Es co-autor de más de 80 artículos científicos y capítulos de libros en las principales revistas internacionales de sostenibilidad y cambio climático. Además, es *founding associate editor* de la revista "Journal on Frontiers in Sustainable Cities". Actualmente, es director de la UPM para Norteamérica y miembro del *Mission Board for Climate-neutral and smart cities* de la Comisión Europea. Es asesor en las comisiones técnicas para la salida de la crisis de Covid-19 de varios gobiernos.



Pedro Linares

Profesor Propio (equivalente a Catedrático) del Departamento de Organización Industrial de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI, director de la Cátedra BP de Energía y Sostenibilidad, y co-fundador y director de Economics for Energy. También es investigador del Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) e Investigador Asociado en MIT CEEPR. Actualmente, Director de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad Pontificia Comillas. Dedicar la mayoría de su investigación a estudiar la relación entre la energía, la economía y el medio ambiente.



Iñigo J. Losada

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad de Cantabria (UC) y Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad de Delaware (EEUU). Es Profesor y Director de Investigación de IHCantabria donde fue Director fundador (2007-2011), tras co-promover su creación. Su investigación abarca la dinámica costera y su relación con la protección costera; el cambio climático y el riesgo costero y el desarrollo de la energía oceánica. En 2018 ha recibido el Premio Rei Jaume I a la Protección del Medio Ambiente y ha sido elegido miembro de la Real Academia Española de Ingeniería. En 2020 ha sido nombrado Académico de la European Academy of Sciences

1.1 El contexto

¿Qué es el cambio climático?

¿Cuáles son los gases de efecto invernadero (GEI)?

¿Cuál es la influencia humana en el cambio climático?

¿Cómo ha avanzado el conocimiento científico?

¿Qué es el cambio climático?

El cambio climático se refiere a los cambios en el estado del clima que pueden identificarse a través de cambios en los valores promedio y/o en la variabilidad de sus propiedades. Estos cambios persisten durante periodos largos de tiempo, típicamente décadas o periodos más largos. Así, mientras que el tiempo atmosférico define las condiciones meteorológicas en el corto plazo, el clima corresponde a la descripción estadística del tiempo atmosférico durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta miles o millones de años.

El cambio climático puede ser originado por procesos naturales internos o por forzamientos externos también naturales tales como la modulación en los ciclos solares o las erupciones volcánicas. También puede ser causado por cambios inducidos por el hombre de forma persistente en la composición de la atmósfera o en los usos del suelo. En este sentido, es necesario hacer constar que la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) define en su artículo 1 el cambio climático como “cambios en el clima directa o indirectamente atribuibles a la actividad del hombre que alteran la composición de la atmósfera global y que se superponen a la variabilidad natural observable en periodos de tiempo equivalentes”. Por tanto, UNFCCC distingue claramente, por un lado, el cambio climático atribuible al hombre que incluye, entre otros, lo que habitualmente se conoce como el calentamiento global y, por otro, la variabilidad climática atribuible a causas naturales.

En este sentido, de acuerdo con el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC en sus siglas en inglés), el calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en un periodo de decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar se ha elevado.

De acuerdo con el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC en sus siglas en inglés), el calentamiento en el sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950 muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en un periodo de decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido y el nivel del mar se ha elevado.

En términos de la explicación física del problema, existe un acuerdo general en la comunidad científica de que la causa fundamental del calentamiento global es el resultado del aumento del efecto invernadero, que es un proceso en el que la radiación térmica emitida por la Tierra queda atrapada en la atmósfera debido a la presencia de un conjunto de gases conocidos como Gases de Efecto Invernadero (GEI). La radiación solar atraviesa la atmósfera y calienta la superficie terrestre. Parte de este calor es irradiado de nuevo hacia el exterior y

parte es absorbido por las moléculas de los GEI e irradiado en todas direcciones (forzamiento radiativo) produciendo un calentamiento de la superficie de la Tierra y de la parte baja de la atmósfera, que genera un aumento de 33 °C en la temperatura media respecto a la que sería en ausencia de dichos gases. Si no fuese por el efecto invernadero, la temperatura en promedio en la Tierra sería de -18 °C. Por tanto, la presencia de los GEI es natural y necesaria para mantener la temperatura de la Tierra en valores habitables, pero el problema está en su aumento y por tanto en una retención y un forzamiento mayores de lo adecuado para la vida en el Planeta.

Una de las características de estos gases es que permanecen activos en la atmósfera durante varios años por lo que se les suele denominar gases de larga permanencia.

¿Cuáles son los gases de efecto invernadero (GEI)?

Entre estos gases se encuentran: el vapor de agua (H_2O), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el dióxido de carbono (CO_2) y los clorofluorocarbonos (CFC).

El vapor de agua es el más abundante, destacando su retroalimentación con el clima. A medida que la Tierra se calienta, aumenta el vapor de agua y consecuentemente la probabilidad de nubosidad y precipitación. Es decir, el vapor de agua responde rápidamente a los cambios en la temperatura, a través de la evaporación, la condensación y la precipitación, incrementando la energía térmica global y contribuyendo al calentamiento.

El CO_2 es un componente menor de la atmósfera (supone aproximadamente el 0,04 %), pero es relevante desde el punto de vista climático puesto que es el principal gas de efecto invernadero antropogénico, contribuyendo a un 60 % del forzamiento radiativo¹. A pesar de su baja concentración, su influencia en las dinámicas atmosféricas es muy relevante ya que las moléculas son capaces de absorber e irradiar

el calor saliente de la Tierra, tal y como se ha explicado en los párrafos precedentes. El CO_2 es producto de procesos naturales tales como la respiración o las erupciones volcánicas, pero también producto de las actividades humanas como la deforestación, el cambio en los usos del suelo o la combustión de combustibles fósiles. El hombre ha contribuido a incrementar la concentración de CO_2 en la atmósfera en más de un tercio desde que comenzara la Revolución Industrial. Este es, sin duda, el GEI de larga permanencia que más está contribuyendo al cambio climático.

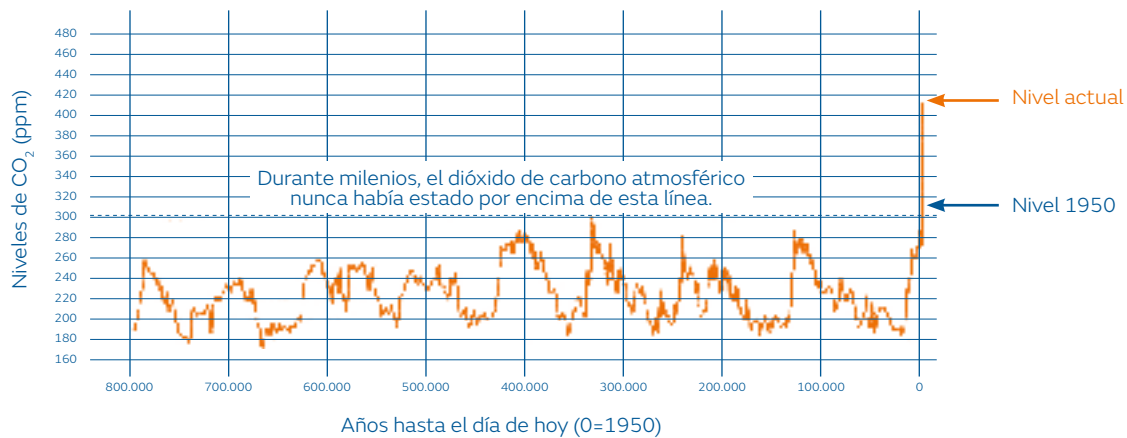
El metano es un hidrocarburo resultado también de procesos naturales y actividades humanas, entre las que se incluye la descomposición de residuos en vertederos, la agricultura, así como la digestión de rumiantes o la gestión del estiércol en ganadería. Su porcentaje en la atmósfera es menor que el CO_2 (en torno al 0,002 %) y contribuye, aproximadamente, al 20 % del forzamiento radiativo. El óxido nitroso está también muy vinculado a las actividades agrícolas, especialmente al uso de fertilizantes comerciales y orgánicos; la combustión de combustibles fósiles o de biomasa, constituye en torno al 0,0003 % de la atmósfera y contribuye al 6 % del efecto invernadero. Finalmente, los CFC son compuestos sintéticos de origen industrial con diferentes aplicaciones, aunque su emisión está actualmente controlada gracias a convenios internacionales para evitar su contribución a la destrucción de la capa de ozono.

¿Cuál es la influencia humana en el cambio climático?

El último informe del IPCC establece que la influencia humana en el sistema climático es clara y, además, demuestra que las emisiones antropogénicas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia.

Entre otras conclusiones, el informe establece que las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial, en gran medida como resultado del crecimiento económico y demográfico,

1 El forzamiento radiativo no es equivalente al efecto invernadero (ver Glosario).

Figura 2 • Evolución de la concentración de CO₂ en la atmósfera en ppm durante los últimos 800.000 años.

Fuente: Luthi, D., et al. 2008; Etheridge, D.M., et al. 2010; Vostok ice core data/J.R. Petit et al.; NOAA Mauna Loa CO₂ record.

y actualmente son mayores que nunca. Esto ha dado lugar a que se hayan alcanzado unas concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso (ver Figura 2) nunca anteriormente registradas, al menos, en los últimos 800.000 años (basándose en la comparación de muestras atmosféricas de núcleos de hielo y mediciones directas más recientes). Los efectos de las emisiones, así como de otros factores antropogénicos, se han detectado en todo el sistema climático y es sumamente probable que hayan sido la causa dominante del calentamiento observado a partir de la segunda mitad del siglo XX.

En los últimos decenios, los cambios del clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos. Los impactos se deben al cambio climático observado, independientemente de su causa, lo que indica la sensibilidad de los sistemas naturales y humanos al cambio del clima.

Los principales impactos son el incremento de la temperatura del aire en superficie media global, el aumento del nivel medio del mar y los cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, como la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de las temperaturas cálidas extremas, la elevación de los niveles máximos del mar y el aumento en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones en diversas regiones.

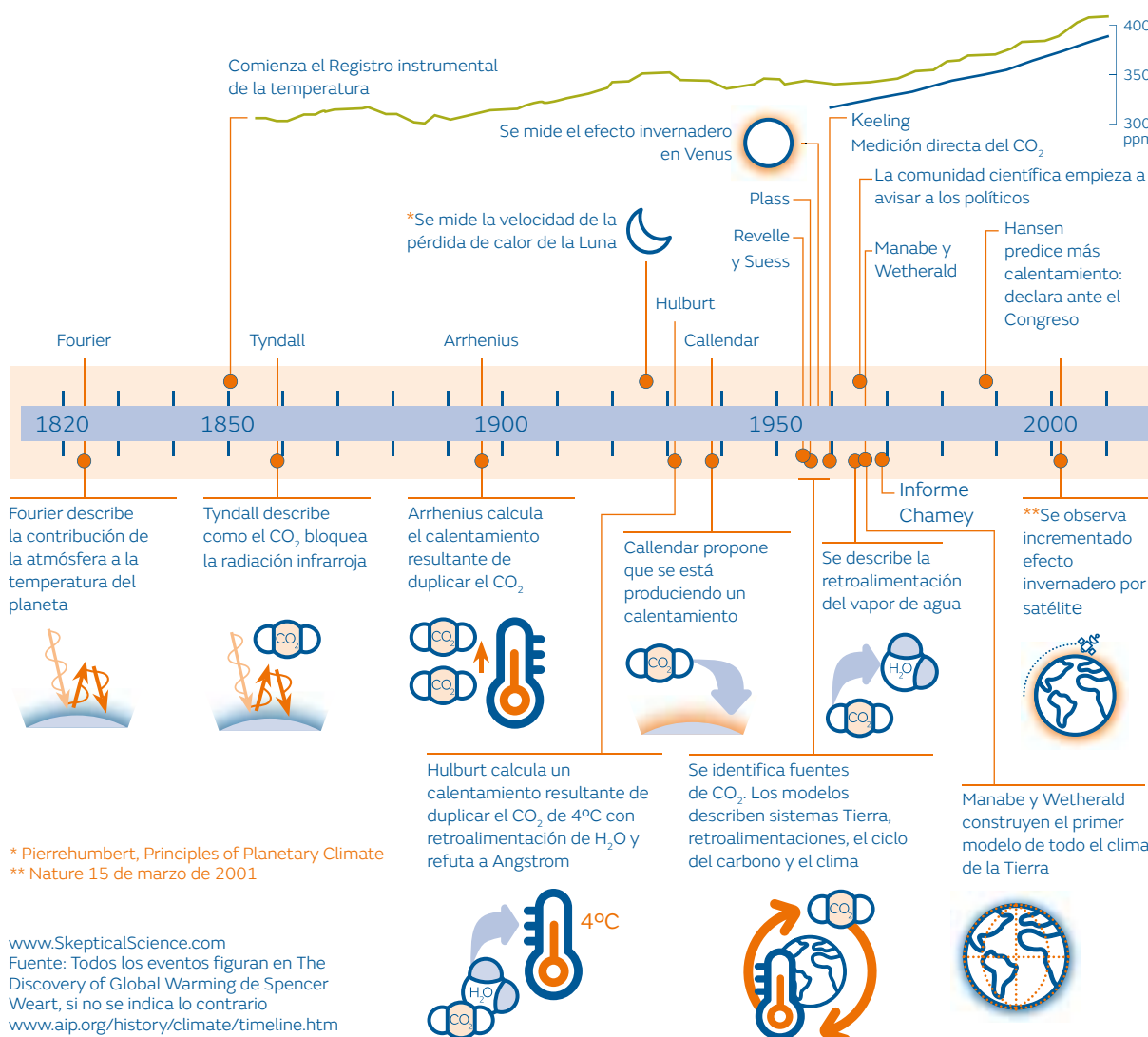
El CO₂ es un componente menor de la atmósfera (supone aproximadamente el 0,04 %), pero es relevante desde el punto de vista climático, puesto que es el principal gas de efecto invernadero antropogénico, constituyendo a un 60 % del forzamiento radiativo. A pesar de su baja concentración, su influencia en las dinámicas atmosféricas es muy relevante ya que las moléculas son capaces de absorber e irradiar el calor saliente de la Tierra.

Pero además de sobre las variables físicas, el cambio climático ha inducido importantes impactos sobre los sistemas naturales y socioeconómicos que se han venido observando y documentando durante la última década. El segundo capítulo recoge un apartado dedicado específicamente a todos los impactos del cambio climático.

¿Cómo ha avanzado el conocimiento científico?

La ciencia del cambio climático y su relación con los gases de efecto invernadero comenzó en 1824 cuando Fourier propuso la idea de que la atmósfera retenía la radiación infrarroja emitida por la tierra, y que esta retención podía variar en función de la actividad humana. El efecto invernadero de los distintos gases fue analizado por Eunice Foote (1856) y por John

Figura 3 • Principales hitos en la ciencia del clima terrestre.



Tyndall (1859). Arrhenius (1896) combinó estas ideas, y calculó el impacto de la variación en la concentración de estos gases en la temperatura. Todos estos avances se produjeron, al igual que otros muchos en la época, por el trabajo individual y aislado (ver Figura 3).

Sin embargo, una creciente preocupación por cuestiones medioambientales comenzó en los años 1960-70, e incluyó la medición más precisa de los cambios de la concentración de CO₂ en la atmósfera que Keeling comenzó a estudiar en 1956. Esta preocupación dio lugar al establecimiento de grupos y programas de investigación de mayor tamaño en universidades y en organismos públicos como

la NASA, capaces de desarrollar modelos computacionales complejos y medidas de mayor fiabilidad. Todo ello culminó con la creación en 1988 del IPCC.

En los últimos decenios, los cambios del clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos. Los impactos se deben al cambio climático observado, independientemente de su causa, lo que indica la sensibilidad de los sistemas naturales y humanos al cambio del clima.

1.2 Las instituciones científicas

¿Qué es el IPCC?

¿Qué documentos elabora el IPCC?

¿Qué dicen los informes del IPCC?

¿Existen otras posturas con respecto al cambio climático?

¿Qué es el IPCC?

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es la organización científica más rigurosa en el ámbito que, además, ha sido sometida al escrutinio de evaluadores y gobiernos de más de 190 países. El IPCC es el principal órgano internacional para la evaluación del cambio climático. Fue creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 1988 para ofrecer una visión científica del estado actual de los conocimientos sobre el cambio climático y sus posibles repercusiones medioambientales y socioeconómicas.

El IPCC es un órgano científico y, como tal, proporciona evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. No lleva a cabo investigación alguna ni supervisa los datos o parámetros relativos al clima, sólo recopila y evalúa el trabajo de la comunidad científica. Para ello, se analiza la documentación científico-técnica disponible en revistas científicas, publicaciones puestas a disposición del IPCC y documentación de otras organizaciones públicas y privadas, incluida la industria. Al tratarse de un órgano intergubernamental, pueden formar parte del mismo todos los países miembros de las Naciones Unidas y de la OMM. Actualmente, 195 países son miembros del IPCC.

El Grupo de Expertos se reúne, por lo menos, una vez al año en sesión plenaria, formada por representantes de los gobiernos, en la que se toman las principales decisiones sobre el programa de trabajo y se elige a los miembros de la Mesa, entre ellos el Presidente. Los gobiernos participan también en los debates sobre el alcance de los informes, la designación de los autores, el proceso de revisión y aceptan, adoptan y aprueban los informes en las sesiones plenarias.

El IPCC es un órgano científico y, como tal, proporciona evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta. No lleva a cabo investigación alguna ni supervisa los datos o parámetros relativos al clima, sólo recopila y evalúa el trabajo de la comunidad científica.

Por su carácter científico e intergubernamental, el IPCC es una fuente excepcional de información científica rigurosa y equilibrada para los tomadores de decisiones. Al asumir los contenidos de los informes del IPCC, los gobiernos reconocen la autoridad de su contenido científico. Así, pues, la labor de la organización es pertinente para la adopción de políticas y, sin embargo, neutral al respecto, nunca preceptiva. Es decir, el IPCC analiza la evidencia científica y hace propuestas de



Figura 4 • Estructura del IPCC.

Fuente: "Así funciona el IPCC" del sitio web del IPCC - Español - Sección: Sobre Nosotros (https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml)

medidas a implementar, pero no son de obligado cumplimiento.

El IPCC se organiza en tres grupos de trabajo y un grupo especial (ver Figura 4). El Grupo de trabajo I se ocupa de las bases físicas del cambio climático; el Grupo de Trabajo II, del impacto del cambio climático y de la adaptación y el Grupo de Trabajo III aborda la mitigación del cambio climático. Asimismo, existe un grupo adicional especial dedicado a los inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero. Su objetivo es formular y perfeccionar una metodología para el cálculo y notificación de las emisiones y las absorciones nacionales de gases de efecto invernadero.

Miles de científicos de todo el mundo contribuyen a la labor del IPCC con carácter voluntario como autores, autores contribuyentes y revisores.

¿Qué documentos elabora el IPCC?

Desde su creación, el IPCC ha preparado cinco informes de evaluación y el sexto se publicará en 2021. Los informes son objeto de un proceso de redacción y examen en varias etapas para garantizar un resultado exhaustivo y objetivo, y se elaboran de forma abierta y transparente.

Miles de expertos contribuyen como revisores para asegurar que se reflejen todos los puntos de vista de la comunidad científica. Mediante un minucioso mecanismo de supervisión, diversos equipos de editores y revisores velan por que se tengan en cuenta todas las observaciones formuladas en el examen de los mismos.

Desde su creación, el IPCC ha preparado cinco informes de evaluación y el sexto se publicará en 2021. Los informes son objeto de un proceso de redacción y examen en varias etapas para garantizar un resultado exhaustivo y objetivo, y se elaboran de forma abierta y transparente. Miles de expertos contribuyen como revisores para asegurar que se reflejen todos los puntos de vista de la comunidad científica.

El proceso de elaboración de informes del IPCC consta de varias etapas de redacción y examen (ver Figura 5). Las múltiples etapas del examen son una parte esencial del proceso del IPCC destinado a garantizar una evaluación exhaustiva, objetiva y transparente de los conocimientos científicos actuales. Los autores preparan un anteproyecto de informe basándose en la bibliografía científica, técnica y socioeconómica de las revistas científicas y de

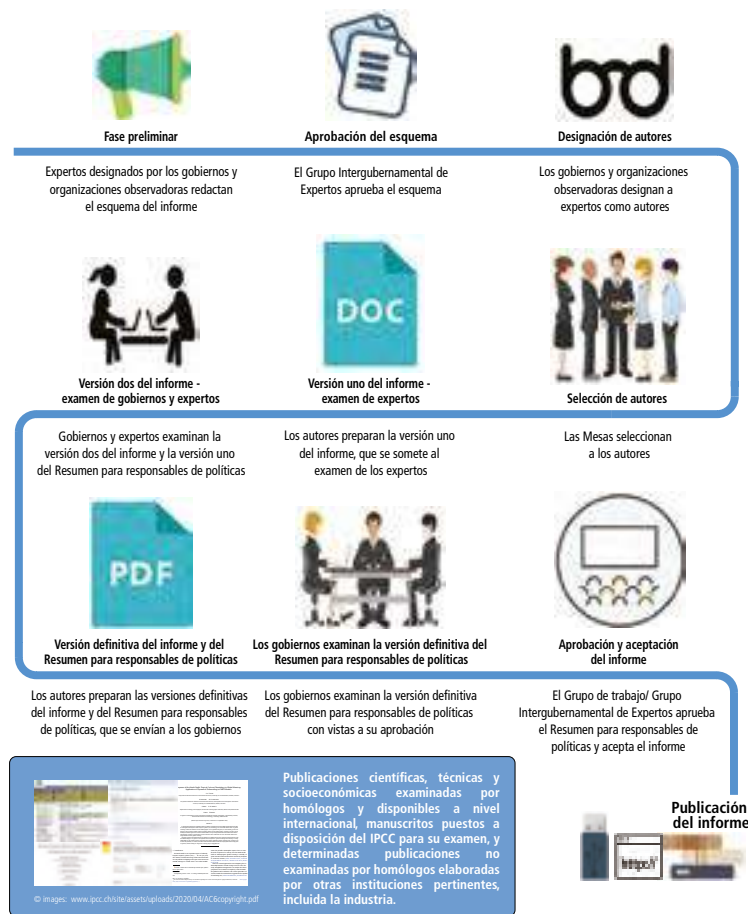


Figura 5 • Proceso de preparación de informes en el IPCC.

Fuente: “Cómo prepara el IPCC sus informes” de IPCC, 2020: *El IPCC y el sexto ciclo de evaluación*, p. 4 (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/10/2020-AC6_es.pdf)

otras publicaciones pertinentes. Esta bibliografía se extrae de las publicaciones científicas con revisiones por pares, pero también incluye documentación enviada al IPCC para su examen, así como otras publicaciones no revisadas por pares.

Tras el examen realizado por los expertos del primer borrador de informe, los equipos de autores preparan un segundo borrador de informe, que tiene en cuenta las observaciones recibidas; y también se elabora una primera versión del Resumen del informe para los responsables de elaboración de políticas. Ambos documentos están sujetos a un examen simultáneo por parte de expertos y gobiernos. Tras recabar las observaciones, los equipos de autores preparan una versión final del informe y del Resumen para responsables de políticas teniendo en cuenta las observaciones recibidas. El borrador de la versión final del informe se

distribuye entre los diversos gobiernos con objeto de que estos presenten por escrito sus observaciones finales sobre el “Resumen para responsables de políticas” antes de la reunión plenaria final de los gobiernos. En dicha reunión se procede a aprobar el Resumen para responsables de políticas línea por línea y a la adopción del informe completo.

A modo de ejemplo, la Figura 6 recoge el número de aportaciones que se realizaron al último informe publicado (AR5).

Figura 6 • Número de observaciones relativas al informe AR5.

		Número de observaciones	Expertos	Gobiernos
Grupo de trabajo I	Primer anteproyecto	21 400	659	-
	Segundo anteproyecto	31 422	800	26
Grupo de trabajo II	Primer anteproyecto	19 598	563	-
	Segundo anteproyecto	28 544	452	33
Grupo de trabajo III	Primer anteproyecto	16 169	602	-
	Segundo anteproyecto	19 554	444	24
Informe de síntesis	Primer anteproyecto	5 944	85	42
Total		142 631	-	-

Nota: algunos expertos se inscriben en más de un Grupo de trabajo y el Informe de síntesis.

Fuente: IPCC, 2015. Cuadro de la Ficha Informativa ¿Cómo funciona el proceso de examen del IPCC?, p.2. (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/04/FS_review_process_es.pdf)

¿Qué dicen los informes del IPCC?

Hasta el momento presente, se han redactado cinco informes (Figura 7). Cada nuevo informe recoge los avances de la ciencia con respecto al informe anterior y también establece en qué áreas es necesaria nueva investigación. El primero se publicó en 1990 y constituyó la base de los sucesivos informes puesto que se estructuró en torno a los tres grupos de trabajo mencionados anteriormente. En ese primer informe la evaluación científica ya decía estar segura de “que existe un efecto de invernadero natural que hace que la Tierra sea más cálida de lo que sería en caso de no existir ese efecto” y “que las emisiones producidas por las actividades humanas aumentan sustancialmente las concentraciones atmosféricas de los gases que producen efecto de invernadero: anhídrido carbónico, metano, clorofluorocarbonos (CFC) y óxido nitroso. Estos aumentos potencian el efecto de invernadero, lo que producirá por término medio un calentamiento adicional de la superficie de la Tierra. El principal gas con efecto de invernadero, el vapor de agua, aumentará como consecuencia del calentamiento del planeta, y a su vez aumentará dicho efecto”. El informe también sirvió de base para la negociación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que se adoptó en 1992 y entró en vigor en 1994.

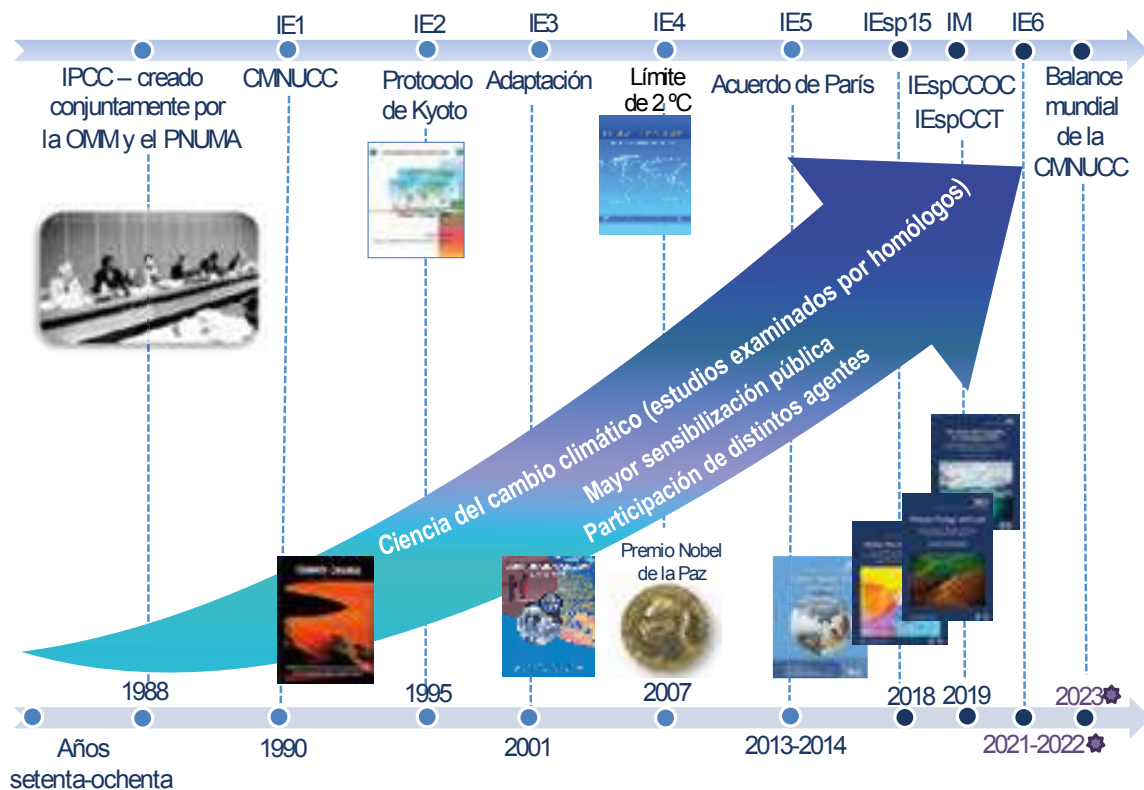
El segundo informe, publicado en 1995, hace incapié en el objetivo de mitigar el cambio climático a través de la consecución del objetivo

Hasta el momento presente, se han redactado cinco informes. Cada nuevo informe recoge los avances de la ciencia con respecto al informe anterior y también establece en qué áreas es necesaria nueva investigación. El primero se publicó en 1990 y constituyó la base de los sucesivos informes, puesto que se estructuró en torno a los tres grupos de trabajo mencionados anteriormente.

último de la CMNUCC expresado en su artículo 2: “la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible”. Así, el documento presenta información científica, técnica y socioeconómica que pueda utilizarse para afrontar los desafíos de alcanzar este objetivo que se resumen en la determinación de las concentraciones de gases de efecto invernadero que pueden considerarse “interferencia antropógena peligrosa en el sistema climático” y la preparación de un futuro que permita el desarrollo económico sostenible.

El tercer informe se publicó en 2001 y da respuesta a una serie de preguntas relacionadas con la clarificación de lo que constituye una

Figura 7 • Evolución de los trabajos científicos en torno al cambio climático desde los años 1970.



Fuente: "Contribución del IPCC a la ciencia climática y la formulación de políticas" de IPCC, 2020: *El IPCC y el sexto ciclo de evaluación*, p. 3 (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/10/2020-AC6_es.pdf)

“interferencia antropógena peligrosa en el sistema climático” y cómo tratar el problema del cambio climático dentro del contexto del desarrollo sostenible; la identificación de los causantes de los cambios observados en los sistemas climáticos y ecológicos desde la época preindustrial; la evaluación de los impactos sobre el clima de las futuras emisiones de gases de efecto invernadero y de los precursores de aerosoles de sulfato, si no se aplicaran políticas específicas para la mitigación del cambio climático; el entendimiento de la inercia en el clima y los sistemas ecológicos y sectores socioeconómicos, y las consecuencias de dicha inercia en las medidas de mitigación y adaptación a los efectos; las consecuencias a corto y largo plazo de la estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero para los sectores climáticos, ecológicos y socioeconómicos; la evaluación de las tecnologías, políticas y costes de las medidas a corto y largo plazo para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero; la identificación de las interacciones entre el

cambio climático, otros problemas ambientales y el desarrollo; y las incertidumbres clave. El cuarto informe, publicado en 2007, se organiza en torno a seis temas: cambios del clima observados y los efectos del cambio climático; las causas del cambio, atendiendo a sus originantes naturales y antropogénicos; las proyecciones de cambio climático futuro y sus impactos; las opciones y respuestas de adaptación y de mitigación (en particular hasta 2030), así como las interrelaciones entre el cambio climático y las medidas de respuesta y el desarrollo sostenible; la perspectiva a largo plazo así como los aspectos científicos, técnicos y socioeconómicos de la adaptación y de la mitigación, en consonancia con los objetivos y disposiciones de la CMCC; y conclusiones sólidas e incertidumbres clave.

En 2014 se presentó el quinto y último informe disponible, en el que se hace hincapié en la evaluación de los aspectos socioeconómicos del cambio climático y sus consecuencias para el desarrollo sostenible, los aspectos

regionales, la gestión de riesgos y la elaboración de una respuesta mediante la adaptación y la mitigación, mostrando además más de 100 evidencias de los impactos producidos por el cambio climático. Se estructura en torno a cuatro temas: Cambios observados y sus causas; Futuros cambios climáticos, riesgos e impactos; Futuras trayectorias de adaptación, mitigación y desarrollo sostenible; y Adaptación y mitigación.

El sexto ciclo (AR6) comenzó su proceso en 2018 y está prevista la publicación de sus informes entre abril de 2021 y mayo de 2022 (ver Figura 8). Hasta el momento, se ha publicado el informe metodológico y tres informes especiales: 1) Informe sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza²; 2) Informe sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres³; y 3) Informe sobre los océanos y la criosfera en un clima cambiante⁴. También se han definido los cinco elementos fundamentales que constituirán el informe: inventario global; interacción entre emisiones, clima, riesgos y vías de desarrollo; costes y beneficios sociales y económicos de la mitigación y adaptación en el contexto de las vías de desarrollo; acciones de mitigación y adaptación en el contexto del desarrollo sostenible; y financiación y medios de apoyo.

¿Existen otras posturas con respecto al cambio climático?

Por su naturaleza, el IPCC trata de incluir los resultados científicos de todos los grupos de investigación a nivel global, considerando tanto los trabajos que demuestran la influencia antropogénica en el clima, como los que rechazan esta hipótesis, siempre que estén validados científicamente. Los expertos que contribuyen a los informes del IPCC valoran todas las contribuciones científicas y las recogen, con mayor o menor amplitud, en los informes, en función de su relevancia. No se puede decir pues que haya núcleos de científicos al margen del IPCC, ya que todos ellos están reflejados en los informes del mismo.

En 2014 se presentó el quinto y último informe disponible. Se estructura en torno a cuatro temas: Cambios observados y sus causas; Futuros cambios climáticos, riesgos e impactos; Futuras trayectorias de adaptación, mitigación y desarrollo sostenible; y adaptación y mitigación. El sexto ciclo (AR6) comenzó su proceso en 2018 y está prevista la publicación de sus informes entre abril de 2021 y mayo de 2022.

De hecho, la certidumbre de las afirmaciones que se hacen en los informes del IPCC depende del grado de consenso en las contribuciones científicas. Sin embargo, sí hay algunas organizaciones que aglutinan a personas (que no tienen por qué ser científicos) que mantienen posiciones contrarias a la evidencia científica mayoritaria, como por ejemplo el Heartland Institute⁵, o la fundación “Climate Intelligence”⁶ que publicó en septiembre de 2019 una carta al Secretario General de Naciones Unidas indicándole que, a su entender, no existe emergencia climática. En todo caso, estos

2 Disponible en: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

3 Disponible en: <https://www.ipcc.ch/srccl/>

4 Disponible en: <https://www.ipcc.ch/srocc/>

5 <https://www.heartland.org/Center-Climate-Environment/>

6 <https://clintel.org>

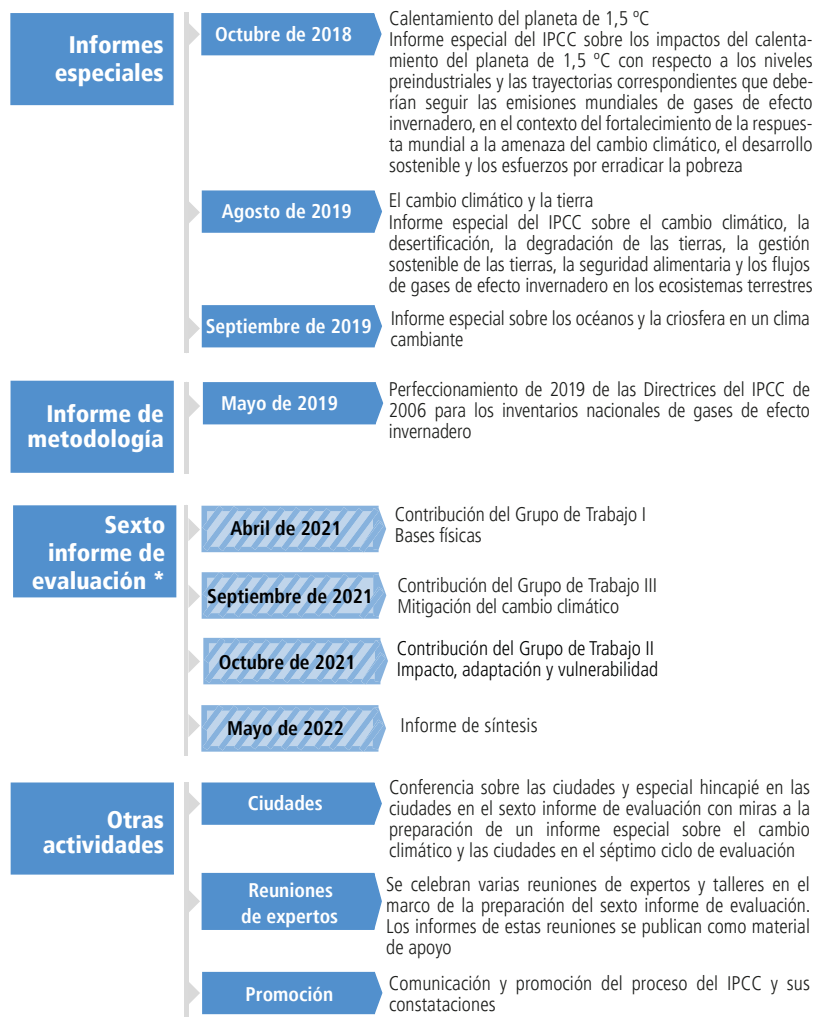


Figura 8 • Ciclo del AR6 del IPCC.

Fuente: "Sexto ciclo de evaluación" de IPCC, 2020: *El IPCC y el sexto ciclo de evaluación*, p. 2 (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/10/2020-AC6_es.pdf)

grupos son minoritarios y, como se ha indicado, la evidencia científica que muestran está incluida en los informes del IPCC.

Ahora bien, es preciso señalar que hay un mayor grado de variación en la posición científica respecto a la magnitud de las acciones a emprender contra el cambio climático, como bien muestra el debate entre Nordhaus y Stern, que muestra la falta de acuerdo entre ambos científicos de reconocido prestigio sobre en las

medidas más efectivas para mitigar el cambio climático debido a sus discrepancias sobre el rol de la tasa de descuento en los modelos climáticos, el progreso técnico de los costes de mitigación o la sensibilidad climática⁷. También en este ámbito hay posiciones "contrarias" y minoritarias como las de Bjorn Lomborg y su Copenhagen Consensus Center⁸, que considera erróneas muchas de las políticas contra el cambio climático.

⁷ Se puede leer un artículo con los detalles del debate en: <https://www.feem.it/en/publications/feem-working-papers-note-di-lavoro-series/disentangling-the-stern-nordhaus-controversy-beyond-the-discounting-clash/>

⁸ <https://www.copenhagenconsensus.com>



2.

Las grandes cuestiones
en torno al cambio climático



José Manuel Moreno

Catedrático de Ecología en la Universidad de Castilla-La Mancha. Desarrolla su actividad en ecología de los incendios forestales y en la relación de estos con el cambio climático. Ha sido Decano Comisario para la puesta en marcha de la Facultad de Ciencias del Medio Ambiente y del Instituto de Ciencias Ambientales, ambos de la Universidad de Castilla-La Mancha. Ha sido miembro de los comités de gestión de los programas de medio ambiente de la Comisión Europea (STEP, EPOCH, ENVIRONMENT), y ha participado en numerosos grupos e instituciones europeas. Ha sido y es miembro de los equipos de autores del Grupo Intergubernamental de Expertos de Cambio Climático (IPCC, de sus siglas en inglés) desde el III Informe de Evaluación, habiendo sido Vicepresidente del Grupo II y miembro del Bureau del IPCC. Es miembro del Comité Científico Asesor del Organismo Autónomo Parques Nacionales.

2.1 ¿Se está acentuando el efecto invernadero? ¿Lo estamos sufriendo ya?

¿Cuál es el balance energético de la Tierra y cómo se mantiene en equilibrio?

¿Por qué tienden a aumentar el CO₂ y el resto de gases de efecto invernadero?

¿Qué tendencias se observan en el clima, la criosfera y el océano?

¿Qué impactos del cambio climático se pueden atribuir a razones antropogénicas?

¿Cuáles son los impactos sobre determinados sistemas y sectores?

¿Cuál es el balance energético de la Tierra y cómo se mantiene en equilibrio?

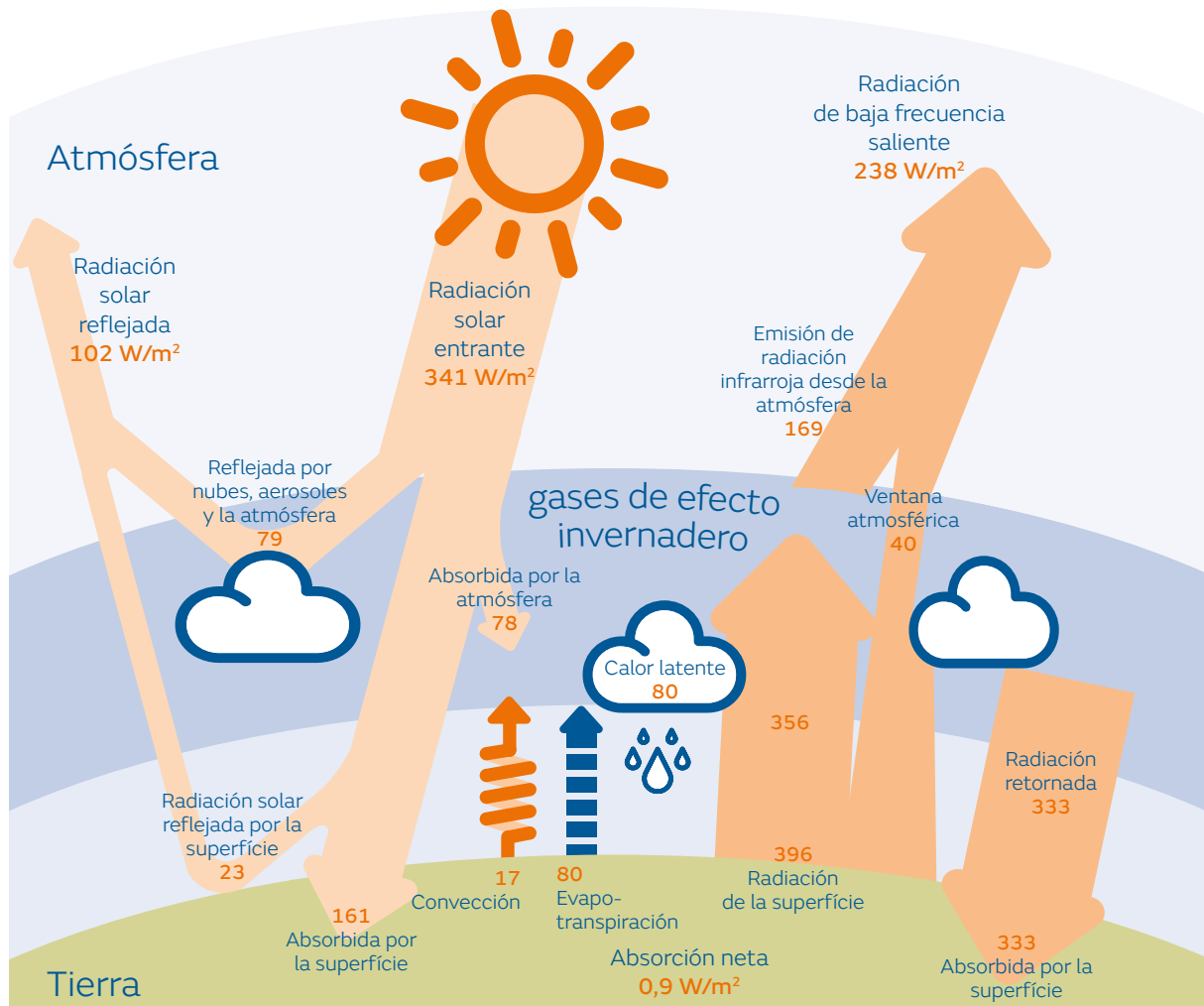
Para entender por qué la Tierra se calienta necesitamos conocer su balance energético, esto es, la diferencia entre la energía que entra y sale del planeta, así como los factores que regulan dicho proceso. La energía que llega a la superficie terrestre procede mayoritariamente del Sol, siendo despreciable la originada en el interior del planeta. A la alta atmósfera llega una radiación de 341 W/m². Esto es, cada metro cuadrado de la alta atmósfera orientado perpendicularmente a nuestro astro rey recibe 341 vatios, o lo que es lo mismo, julios de energía por cada segundo. Es lo que se conoce como la constante solar, y su variación a lo largo de los ciclos solares es pequeña (~0,25 W/m²). La longitud de onda de esta radiación tiene su máximo en la banda visible del espectro electromagnético y nuestra atmósfera es transparente a ella. Aun así, no toda la energía incidente en la alta atmósfera llega a la superficie terrestre, ya que parte es reflejada o absorbida por la atmósfera (ver Figura 9). De la que lo hace, otra parte es reflejada por la propia superficie terrestre, por lo que solo un 47 % del total incidente se absorbe y nos calienta⁹.

Todo cuerpo caliente emite radiación en una longitud de onda que es inversamente

proporcional a su temperatura. La temperatura media de la Tierra es de unos 15 °C, por lo que emite radiación en la parte infrarroja del espectro, y es conocida como radiación térmica. La atmósfera es prácticamente opaca a este tipo de radiación, lo que hace que, de los 396 W/m² de radiación térmica emitidos por la superficie terrestre, 333 W/m² retornen a la misma (ver Figura 9). Al final, toda la energía será vuelta a irradiar al espacio. No obstante, el hecho de que no lo sea instantáneamente y se retenga por un tiempo permite mantener al planeta más caliente de lo que estaría si no tuviésemos atmósfera, es el conocido efecto invernadero. De no existir, nuestra temperatura media superficial sería de -18 °C, convirtiendo al planeta en una bola de hielo.

El balance energético neto anual de entradas y salidas a principios de los años 2000 era positivo. Esto es, existía un desequilibrio energético al ser las entradas de energía mayores que las salidas. Esto implica que la Tierra estaría acumulando energía y calentándose. Cambiar la temperatura supone modificar también otras variables climáticas que dependen de ella, como es la cantidad de vapor de agua que hay en la atmósfera y, en general, el ciclo hidrológico global, entre otras. Esto es justo lo que estamos haciendo.

9 Trenberth, K.E., J.T. Fasullo, and J. Kiehl, *Earth's global energy budget*. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009. 90(3): p. 311-324.

Figura 9 • Flujos energéticos medios anuales de la tierra (en W/m^2) desde Marzo de 2000 a Mayo de 2004.

La parte izquierda muestra los flujos energéticos procedentes del Sol (radiación visible) y la derecha los procedentes de la superficie terrestre hacia el espacio (radiación infrarroja). La anchura de las barras es proporcional a la magnitud de los flujos energéticos.

Fuente: Trenberth, K.E., J.T. Fasullo, and J. Kiehl, *Earth's global energy budget*. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009. 90(3): p. 311-324.

Puesto que el hombre viene alterando la atmósfera y la superficie terrestre (téngase presente que más de la mitad del planeta lo hemos deforestado para nuestra agricultura), interesa conocer cómo es el balance energético de la Tierra. Este ejercicio no es nada sencillo, pero las cuantificaciones que se vienen haciendo recientemente gracias a los satélites que permiten medir en la alta atmósfera la energía que entra y sale, lo ha hecho posible. El balance energético neto anual de entradas y salidas a principios de los años 2000 era positivo en $+0,9 \text{ W/m}^2$. Esto es, existía un desequilibrio energético al ser las entradas de energía mayores que las salidas. Esto implica que la Tierra estaría acumulando energía y

calentándose (ver Figura 9). Como veremos más adelante, esto es la demostración de que, efectivamente, cambiar los factores que regulan el balance energético, como la composición atmosférica o la faz de la superficie terrestre, puede calentar el planeta. Cambiar la temperatura de la superficie supone modificar también otras variables climáticas que dependen de ella, como es la cantidad de vapor de agua que hay en la atmósfera y, en general, el ciclo hidrológico global, entre otras. Esto es justo lo que estamos haciendo.

La idea de que la atmósfera juega un papel crucial sobre el clima de nuestro planeta no es nueva. El matemático francés Joseph Fourier lo

propuso en 1824 y el físico de origen irlandés John Tyndall lo demostró experimentalmente en 1863. Su observación de que algunos gases, como el vapor de agua y el CO_2 , eran prácticamente opacos a la radiación térmica sentó las bases para conocer el papel de la atmósfera en el clima y del efecto invernadero. Pocos años más tarde (1896), el sueco Svante Arrhenius, Premio Nobel de Química, produjo los primeros cálculos sobre el efecto que tendría doblar la concentración de dióxido de carbono, uno de esos gases que contribuyen al efecto invernadero (GEI). Forman estos gases el vapor de agua, las nubes, el CO_2 y otros compuestos (CH_4 , N_2O , O_3 , y los CFC [clorofluorocarbonos]), que contribuyen con un 50 %, 25 %, 20 % y 5 %, respectivamente, a dicho efecto. Las partículas atmosféricas (polvo y aerosoles) cierran el grupo de agentes que contribuyen al mismo¹⁰. Aunque el CO_2 no es el principal componente de la atmósfera, su papel es particularmente relevante porque, al incrementar su concentración atmosférica, lo hace la temperatura y, con ello, la cantidad de vapor de agua y nubes. Doblar la concentración preindustrial de CO_2 supondría añadir una absorción energética de 4 W/m^2 , pero, si incluimos sus efectos indirectos sobre el vapor de agua y las nubes, su acción alcanzaría¹¹ 20 W/m^2 . Esto explica que, aunque el CO_2 exista en cantidades muy pequeñas, como veremos a continuación, su efecto sobre el clima sea tan importante.

¿Por qué tienden a aumentar el CO_2 y el resto de gases de efecto invernadero?

La concentración media de CO_2 en la atmósfera antes de la revolución industrial era de 278 ppm (partes por millón, en volumen). Durante lo más

intenso de la última glaciación, su concentración fue de 180-200 ppm. La variación entre periodos interglaciares cálidos y glaciares fríos se ha mantenido a lo largo de los últimos ciclos glaciares sufridos por nuestro planeta en unas 80-100 ppm, siendo más alta en los momentos cálidos del ciclo glacial que en los fríos¹².

La concentración atmosférica de CO_2 aumenta porque se emite este compuesto en los procesos de combustión, la fabricación de cemento o la deforestación y consiguiente oxidación de la materia orgánica acumulada en el suelo y las plantas. Entre 1750 y 2011 se emitieron a la atmósfera 2010 Gt CO_2 (gigatón de CO_2 , esto es 109 toneladas), la mitad de las cuales lo fueron desde 1970¹³. Esto es, el ritmo de emisiones se ha acelerado en las últimas décadas. De acuerdo con ello, la concentración atmosférica de CO_2 fue creciendo lentamente desde la revolución industrial hasta mediados del siglo pasado, en que su concentración apenas alcanzaba 320 ppm. Desde entonces, ha aumentado aceleradamente, tanto que la medida actual (mayo, 2020) en el observatorio de referencia de Mauna Loa, Hawái, EE. UU., era de 417 ppm (50 % mayor que la concentración preindustrial)¹⁴. Concentraciones como las actuales no se han registrado en la Tierra desde el Plioceno, hace 2,5-3,0 millones de años. Las tendencias de otros GEI son parecidas. A finales de 2019, la concentración de CH_4 era de 1.869 ppb (partes por billón [millardo], en volumen) y la de N_2O de 331 ppb, lo que representan aumentos del 259 % y 143 %, respectivamente, con relación a su nivel preindustrial¹⁵ (ver Figura 10).

A los cambios en la concentración de los principales GEI hay que añadir los cambios en el ozono (troposférico y estratosférico), los CFC,

10 Lacis, A.A., et al., *Atmospheric CO_2 : Principal control knob governing Earth's temperature*. Science, 2010. 330(6002): p. 356-359.

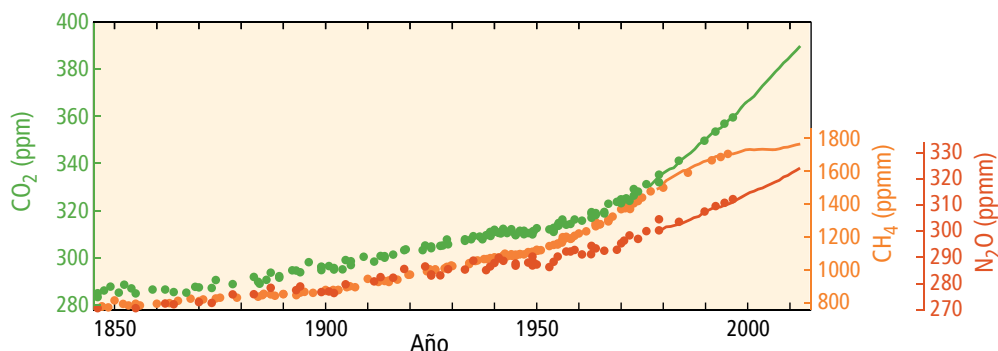
11 Schmidt, G.A., et al., *Attribution of the present-day total greenhouse effect*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010. 115(D20).

12 Lüthi, D., et al., *High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present*. Nature, 2008. 453(7193): p. 379-382.

13 IPCC, *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2014*: IPCC, Geneva, Switzerland.

14 Keeling, R.F. and C.D. Keeling, *Atmospheric Monthly In Situ CO_2 Data - Mauna Loa Observatory, Hawaii, in Scripps CO_2 Program Data*. UC San Diego Library Digital Collections. 2017.

15 WMO, *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019*. 2020.

Figura 10 • Tendencias de variación de los principales gases de efecto invernadero (CO_2 , N_2O y CH_4) desde 1850.

Fuente: RRP.1 (panel c) de IPCC, 2014: Resumen para responsables de políticas. En: *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza.

los aerosoles y el polvo. Además, para que el balance energético sea completo hay que añadir los cambios en el albedo terrestre, esto es, la fracción de radiación solar que es reflejada por el suelo, el mar, la nieve y el hielo, que equivale a 7 % de la radiación incidente. La nieve y el hielo tienen un albedo alto (próximo a 1), esto es, reflejan buena parte de la radiación que incide sobre ellos, y su pérdida hará que nos calentemos más. La vegetación y el océano lo tienen bajo, por tanto, la absorben. La deforestación elimina la vegetación y expone el suelo en mayor o menor medida, según sean los cultivos. El albedo del suelo depende de su color y humedad, entre otros, y tiende a ser menor que el de la vegetación que sustenta.

El Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), viene calculando en sus informes el efecto resultante de todos estos cambios que están ocurriendo en la Tierra, computando lo que se denomina forzamiento radiativo o climático, esto es, la capacidad de absorber o transmitir energía que resulta de cada uno de los cambios que hacemos en la superficie terrestre o en la atmósfera. Un forzamiento positivo significa que el planeta se calienta, mientras que si es negativo se enfría. El forzamiento antropogénico total ha crecido ininterrumpidamente desde la época preindustrial hasta ahora. Establezcamos

A los cambios en la concentración de los principales GEI, hay que añadir los cambios en el ozono (troposférico y estratosférico), los CFC, los aerosoles y el polvo. Además, para que el balance energético sea completo, hay que añadir los cambios en el albedo terrestre, esto es, la fracción de radiación solar que es reflejada por el suelo, el mar, la nieve y el hielo.

éste en 0 W/m^2 en 1750, año de referencia frente al cual se hacen los cálculos. En 1950 fue de $+0,57 \text{ W/m}^2$, en 1980, $+1,25 \text{ W/m}^2$ y en 2011, fecha de los datos del último informe del IPCC¹⁶, $+2,29 \text{ W/m}^2$. Buena parte del forzamiento radiativo total es debido al CO_2 , cuyas emisiones en 2011 representaban un forzamiento de $+1,68 \text{ W/m}^2$ (ver Figura 11), esto es, un 75 % del total. En 2019¹⁷, esta cifra ha aumentado hasta $+2,07 \text{ W/m}^2$.

¿Qué tendencias se observan en el clima, la criosfera y el océano?

En consonancia con las emisiones de GEI y otros cambios planetarios, y los correspondientes forzamientos climáticos, a finales de 2019 la temperatura media de la superficie terrestre había aumentado $1,1 \text{ }^\circ\text{C}$. El calentamiento ha sido mucho mayor en los últimos años,

16 Myhre, G., et al., *Anthropogenic and natural radiative forcing. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 659–740. 2013, Cambridge: Cambridge University Press.

17 NOAA. *The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI)*. 2020 [cited 2020 May/25]; Available from: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>.

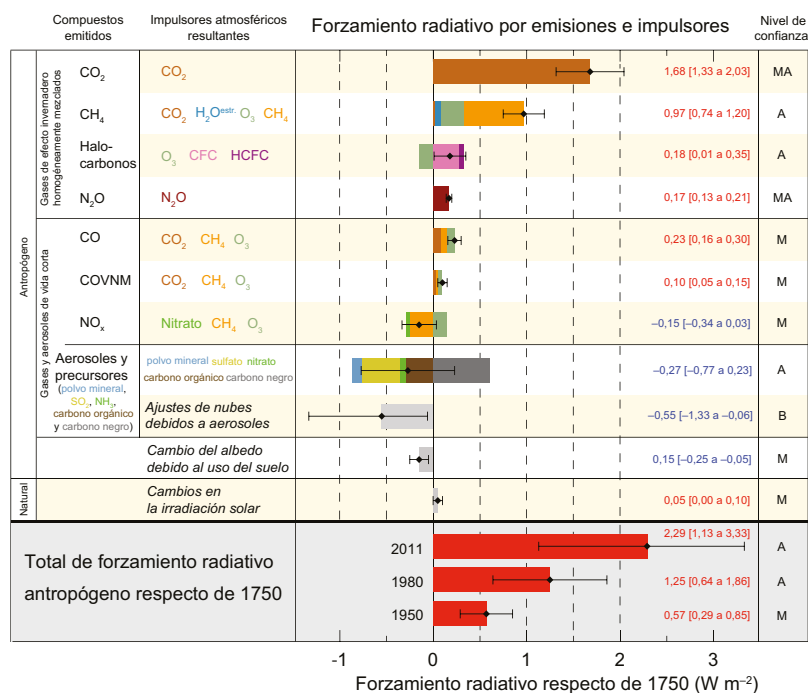


Figura 11 • Valores medios e incertidumbre (5 % al 95 %) de la contribución de los diferentes gases y agentes al forzamiento radiativo medio global (colores densos) o al forzamiento radiativo efectivo medio global (este incluye el ajuste sobre el vapor de agua y las nubes, colores con trama) para el periodo 1750 a 2011.

Fuente: RRP5 de IPCC, 2013: *Resumen para responsables de políticas*. En: *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. (https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf)

de manera que, desde los años 1980, cada década ha sido más cálida que la anterior, lo que es insólito en el periodo de observaciones que comienza en 1850. El 2019 ha sido el segundo año más cálido desde que tenemos registros, al igual que los últimos cinco años¹⁸. El calentamiento no se reparte por igual entre la tierra y el océano, ni por regiones, ya que algunas se calientan más que la media, como son las zonas polares o la región mediterránea en la que nos encontramos¹⁹. Así, en España, nos hemos calentado hasta ahora 1,7 °C. Este aumento es particularmente notable durante el verano, estación que se ha alargado unas cinco semanas desde los años 1980. En este periodo, las noches tórridas (>25 °C) en las capitales españolas se han multiplicado por 10, los días bajo ola de calor se han duplicado, mientras que los de frío se han reducido un 25 %; las olas de

calor de verano se han multiplicado por 10. De otro lado, las precipitaciones se han reducido moderadamente (-18,7 mm por década, con una reducción de 16 % en las últimas cinco décadas)²⁰.

Los hielos glaciares de las montañas, Groenlandia, el Ártico y la Antártida juegan un papel crucial en el clima. Los glaciares de montaña vienen perdiendo hielo sin parar. En España, estos glaciares apenas cubren ahora un 10 % de la superficie que ocupaban hace cien años. Los glaciares pirenaicos, que son los más importantes de España, apenas albergan ahora un 3,3 % de los 886 hm³ de agua que llegaron a tener a finales del siglo XIX²¹. La extensión de hielo ártico decrece continuamente y, en lo que va de siglo, se han registrado valores mínimos, tanto de la extensión mínima en

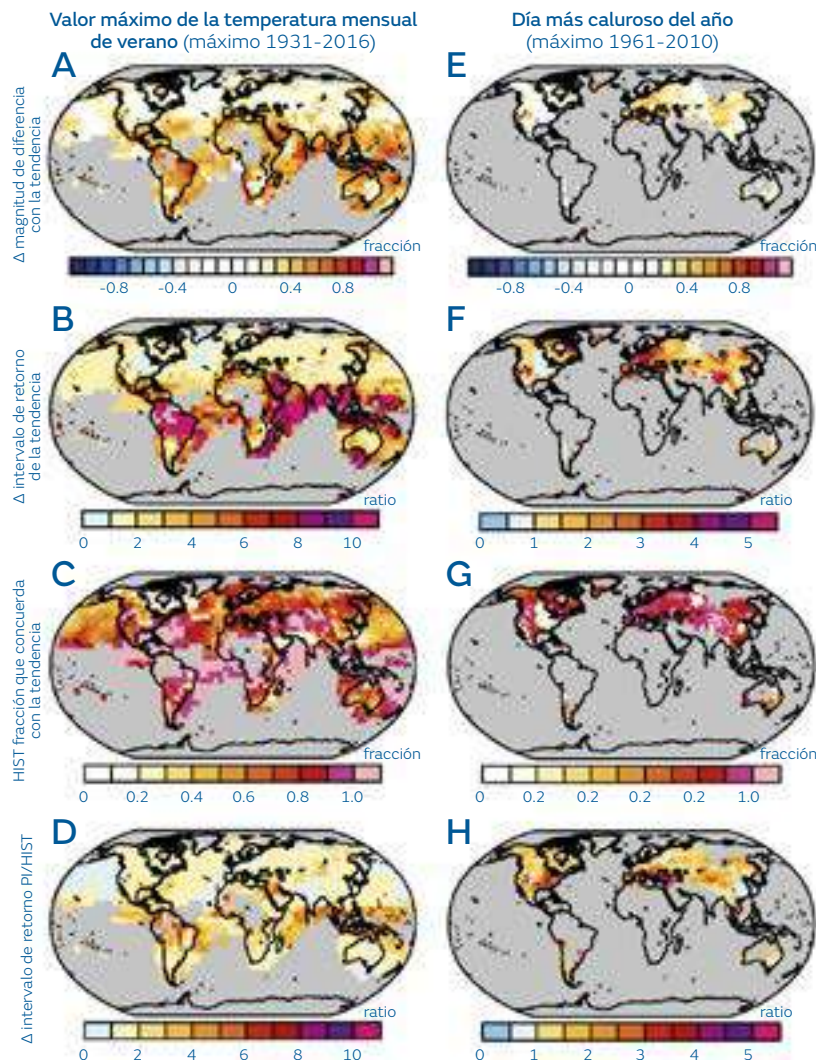
18 WMO, *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019*. 2020.

19 Seneviratne, S.I., et al., *Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets*. *Nature*, 2016. 529(7587): p. 477-483.

20 Vicente-Serrano, S.M., et al., *Temporal evolution of surface humidity in Spain: recent trends and possible physical mechanisms*. *Climate Dynamics*, 2014. 42(9): p. 2655-2674.
Vicente Serrano, S.M., et al., *An updated review on recent trends in observational surface atmospheric variables and their extremes over Spain*. *Cuadernos de investigación geográfica/Geographical Research Letters*, 2017(43): p. 209-232.

21 MITECO. *Glaciares - Evolución y Situación*. 2020 [cited 2020 20/05]; Available from: <https://www.miteco.gob.es/ca/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/ERHIN/glaciares-evolucion/default.aspx>.

Figura 12 • Medidas de atribución realizadas sobre una rejilla global para: (A – D) la temperatura máxima de la media de las máximas mensuales de verano y (E – H) el día más caluroso del año (A y E).



La contribución de la tendencia observada a la magnitud del evento. Nótese la dominancia de colores amarillo oscuro, lo que indica contribuciones a la tendencia observada para la magnitud de los eventos extremos analizados del entorno de 0,4 en proporción, o un 40 %. (B y F) La contribución mediana de la tendencia observada a la probabilidad del evento. Obsérvese que los colores dominantes indican que estos eventos han aumentado su probabilidad de ocurrencia en amplias zonas del planeta en al menos 5 veces, esto es, son mucho más probables en el clima actual de lo que eran en el clima no perturbado. (C y G) La probabilidad de la tendencia observada en las simulaciones históricas del modelo climático, observándose que esta es mucho más probable que ocurra en el clima histórico observado (HIST) que en clima preindustrial (PI), no perturbado. (D y H) La contribución mediana del forzamiento histórico a la probabilidad del evento, observándose que amplias áreas muestran una probabilidad de exceder el valor máximo en las simulaciones históricas, esto es, en el clima perturbado, que en las de clima preindustrial o no perturbado, habiendo aumentado esta probabilidad en 4 veces o más en amplias zonas del mundo.

Fuente: Noah S. Diffenbaugh, Deepti Singh, View ORCID Profile Justin S. Mankin, Daniel E. Horton, Daniel L. Swain, Danielle Touma, Allison Charland, Yunjie Liu, Matz Haugen, Michael Tsiang, and Bala Rajaratnam. *Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events*. PNAS May 9, 2017 114 (19) 4881-4886; first published April 24, 2017

<https://www.pnas.org/content/114/19/4881>

septiembre, como de la máxima en marzo. El hielo de Groenlandia se derrite en cantidades crecientes y las mayores pérdidas se han registrado también en lo que va de siglo. Entre 2002 y 2006 se perdieron 260 Gt de hielo cada año, lo que equivale a 0,72 mm de ascenso del nivel de mar. La Antártida venía ganando hielo ligeramente hasta 2016, en que se revertió la tendencia; desde entonces ha permanecido en niveles relativamente bajos. Aunque se pensaba que sus hielos eran estables, descubrimientos recientes cuestionan tal asunción, y puede que haya comenzado la pérdida de algunos de sus

hielos masivos. El calentamiento del mar y el aporte de agua de los glaciares y casquetes polares afincados en tierra hace que el nivel medio del mar esté subiendo, habiendo sido su subida anual de 3,3 mm en los últimos 27 años. Este aumento ha venido acelerándose, sobre todo por la incorporación de agua glacial²².

El océano absorbe un cuarto del CO₂ expulsado a la atmósfera, convirtiéndose en un buen aliado para reducir el efecto invernadero. Sin embargo, esta absorción tiene consecuencias ya que la solubilidad del CO₂ en el agua aumenta con

22 WMO, WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019. 2020.

Meredith, M., et al., *Polar Regions*, in *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, H.-O. Pörtner, et al., Editors. 2019, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. p. 206-320.

la concentración atmosférica. Al disolverse el CO_2 y reaccionar con el agua se convierte en ácido carbónico, el cual se disocia produciendo protones $[\text{H}^+]$ y aniones bicarbonato $[\text{HCO}_3^-]$. Esto hace que el pH del agua marina disminuya o, lo que es lo mismo, que se acidifique. Desde los años 1980, las aguas superficiales del océano se han acidificado a un ritmo de -0,017 a -0,027 unidades de pH por década, ritmo que excede en 50 veces lo conocido históricamente. La acidificación es muy negativa para muchos organismos marinos que usan estructuras a base de carbonato cálcico, como los corales, el zooplankton y los mariscos, muchos de los cuales están en la base de la cadena trófica. Por otro lado, el agua oceánica pierde oxígeno al calentarse. Se calcula que, desde mediados del siglo pasado, se ha perdido entre el 1 %-2 % de oxígeno en las aguas superficiales. Estudios recientes muestran que la combinación de aumento de temperatura, acidificación e hipoxia supone una de las mayores amenazas para el ecosistema oceánico²³.

Los efectos más desastrosos del clima se manifiestan a través de lo que se conoce como eventos extremos, esto es, fenómenos meteorológicos o climáticos desusadamente raros, normalmente por debajo o encima del percentil 10 o 90, respectivamente, de la función de densidad de probabilidades de las observaciones pasadas. Olas de calor, inundaciones, sequías, tormentas y huracanes son, entre otros, algunos de los eventos extremos más importantes. En general, estos están aumentando en el mundo, aunque no todos ellos lo hacen de igual manera.

Más aún, este aumento se relaciona crecientemente con el cambio climático antropogénico. Esta asociación se hace a través de estudios en los que se analiza si la probabilidad o severidad de un determinado evento (por ejemplo, la ola de calor de la Península Ibérica del verano de 2018) era la misma en el clima normal o preindustrial, esto

El océano absorbe un cuarto del CO_2 expulsado a la atmósfera, convirtiéndose en un buen aliado para reducir el efecto invernadero. Sin embargo, esta absorción tiene consecuencias, ya que la solubilidad del CO_2 en el agua aumenta con la concentración atmosférica. Al disolverse el CO_2 y reaccionar con el agua, se convierte en ácido carbónico, el cual se disocia produciendo protones y aniones bicarbonato.

es, el existente antes de perturbarlo, que en el actual o perturbado. Este tipo de estudio se denomina de atribución, pues se trata de atribuir causa (el cambio climático antropogénico) a un fenómeno observado. El calentamiento global experimentado hasta ahora ha hecho que la probabilidad o severidad del mes más cálido o el día más cálido del año en el mundo haya aumentado en más del 80 %. De igual manera, la probabilidad del año más seco o del periodo de cinco días más húmedo ha aumentado un 57 % y 41 %, respectivamente²⁴ (ver Figura 12). El número de eventos extremos ocasionados en parte por el cambio climático no hace sino aumentar.

¿Qué impactos del cambio climático se pueden atribuir a razones antropogénicas?

El cambio climático aumenta los riesgos sobre los sistemas naturales y los bienes y servicios humanos, incluyendo las vidas humanas. Los riesgos emergen como consecuencia de los peligros del clima y su variabilidad, así como del cambio climático, pero no solo. La exposición y la vulnerabilidad son determinantes y estos son factores que dependen grandemente de los sistemas sociales y la gobernanza. Por tanto, no hay que perder la visión de que la materialización de los riesgos en forma de impactos no es solo debido a lo que no controlamos (el clima), sino también a lo que crea nuestra sociedad con

23 Bindoff, N.L., et al., *Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities*, in *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, H.-O. Pörtner, et al., Editors. 2019, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. p. 448-547.

24 Diffenbaugh, N.S., et al., *Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017. 114(19): p. 4881-4886.

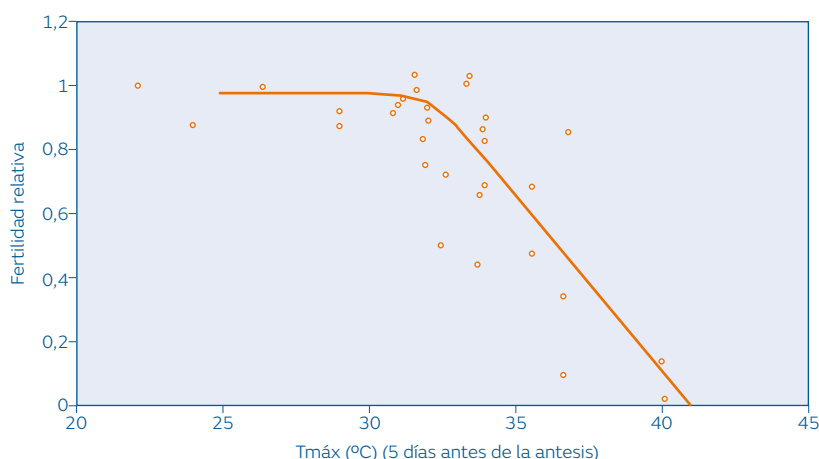
formas de vivir²⁵. Los impactos del cambio climático vienen observándose a lo largo y ancho del mundo en los distintos sectores y sistemas que han sido analizados. El V Informe de Evaluación del IPCC²⁶ concluyó que, en todo el mundo, tanto en la tierra como en el mar, en todos los continentes y océanos y para los diferentes sistemas naturales o socioecológicos se pudieron encontrar impactos que, con mayor o menor incertidumbre, eran asociables al cambio climático observado.

La dificultad de poder encontrar estudios en donde se hubiese hecho una atribución en la forma comentada anteriormente hizo que no se pudiese diferenciar entre cambio climático observado o cambio climático de origen antrópico. Aun así, podemos decir que los impactos del cambio climático observado son ya generalizados, aunque no podamos atribuirlo con precisión al cambio climático antropogénico. Hay que recordar que los datos usados en ese informe se basaban en un ascenso de temperatura global que era casi 0,4 °C menor que el que estamos experimentando actualmente. La dificultad de asociar impactos al cambio climático, antropogénico o no, no debe

Podemos decir que los impactos del cambio climático observado son ya generalizados, aunque no podamos atribuirlo con precisión al cambio antropogénico. La dificultad de asociar impactos a dicho cambio no debe minusvalorarse, pues para hacer tal asociación se precisan series de datos largas y fenómenos en los que sea posible diferenciar la acción humana de la del clima, lo que es extraordinariamente difícil dada la magnitud de nuestra influencia sobre el planeta.

minusvalorarse pues para hacer tal asociación se precisan series de datos largas y fenómenos en los que sea posible diferenciar la acción humana de la del clima, lo que es extraordinariamente difícil dada la magnitud de nuestra influencia sobre el planeta. Además, las observaciones en el mundo natural raramente tienen un desarrollo equivalente al de las meteorológicas, las cuales vienen registrándose regularmente desde hace décadas.

Figura 13 • Fertilidad relativa de la espiguilla del trigo en función de la temperatura máxima en el periodo de cinco días anterior a la antesis.



Se consideraron 35 granos por espiguilla como fertilidad máxima (=1). Nótese cómo la fertilidad de la espiguilla disminuye grandemente conforme se exceden ~32 °C.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Moriondo, M., C. Giannakopoulos, and M. Bindi, *Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation*. Climatic Change, 2011. 104(3): p. 679-701.

25 Moreno, J.M., et al., Marco conceptual y contexto regional, in *Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos – Informe RIOCCADAPT*, J.M. Moreno, et al., Editors. 2020, McGraw-Hill: Madrid, España. p. 1-47.

26 IPCC, *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 2014*: IPCC, Geneva, Switzerland.

¿Cuáles son los impactos de cambio climático sobre determinados sistemas y sectores?

Agua

La reducción de precipitaciones que está ocurriendo en las zonas subtropicales del planeta, como las áreas de clima mediterráneo, entre otras, se manifiesta en España en una reducción del caudal de los ríos. El análisis de 74 cabeceras sin alterar de ríos de toda España durante las últimas cuatro décadas del siglo XX muestra que el 98 % de ellos perdió caudal a un ritmo medio de -1.45 % por año, lo que equivale a una reducción total de 153 hm³ de caudales anuales²⁷. La disminución es mayor en primavera y verano. El hecho de que se encuentren tendencias negativas y significativas en las cabeceras de ríos mediterráneos, caracterizados por su gran irregularidad, evidencia la potente señal de cambio que se está experimentando en España.

Producción de alimentos

La ganadería viene sufriendo impactos directos como consecuencia del incremento de la temperatura, particularmente durante las olas de calor. Esto hace que la productividad del ganado disminuya, aunque no todas las especies son igualmente sensibles. Los impactos son también indirectos, debido a la disminución en cantidad o calidad del forraje en las zonas más expuestas a reducciones de precipitación y sequía²⁸. En lo referente a la acuicultura, el ascenso de la temperatura media del agua marina, las olas de calor marinas, la eutrofización, la hipoxia, los afloramientos de algas nocivas, la acidificación y el aumento de

enfermedades son factores que contribuyen a la disminución de la productividad en un sector que ha cobrado gran importancia en la alimentación²⁹. La producción de las cosechas de secano se está viendo amenazada, con tendencias a reducirse debido a la disminución y variabilidad de las precipitaciones. Entre 1989 y 2009, el cambio climático observado ha reducido los rendimientos de trigo, maíz, cebada y remolacha en España³⁰. Las altas temperaturas, en particular las olas de calor son especialmente relevantes, sobre todo si ocurren en el periodo de formación del grano, lo que puede tener un gran impacto en la producción final de las cosechas³¹.

Ecosistemas terrestres y acuáticos continentales

El aumento de temperatura, la falta de precipitación y los cambios en la estacionalidad de las lluvias están produciendo alteraciones en los ecosistemas terrestres, tanto a nivel de los productores primarios como del resto de la red trófica. Las sequías son elementos particularmente nocivos, habiéndose detectado pérdidas de productividad en los bosques, particularmente en las zonas mediterráneas, así como incrementos en la defoliación debido a la aparición de insectos y hongos, así como otras alteraciones de la red alimentaria³².

La diferente sensibilidad de las plantas y sus herbívoros al calentamiento produce avances en la foliación y floración y retrasos en la caída de las hojas, lo que conduce a falta de sincronía de los herbívoros con las plantas que les sustentan y de estos con sus depredadores, produciendo alteraciones en las poblaciones de unos y otros.

27 Martínez-Fernández, J., N. Sanchez, and C.M. Herrero-Jimenez, *Recent trends in rivers with near-natural flow regime: The case of the river headwaters in Spain*. Progress in Physical Geography, 2013. 37(5): p. 685-700.

28 Rivera-Ferre, M.G., et al., *Re-framing the climate change debate in the livestock sector: mitigation and adaptation options*. WIREs Climate Change, 2016. 7(6): p. 869-892.

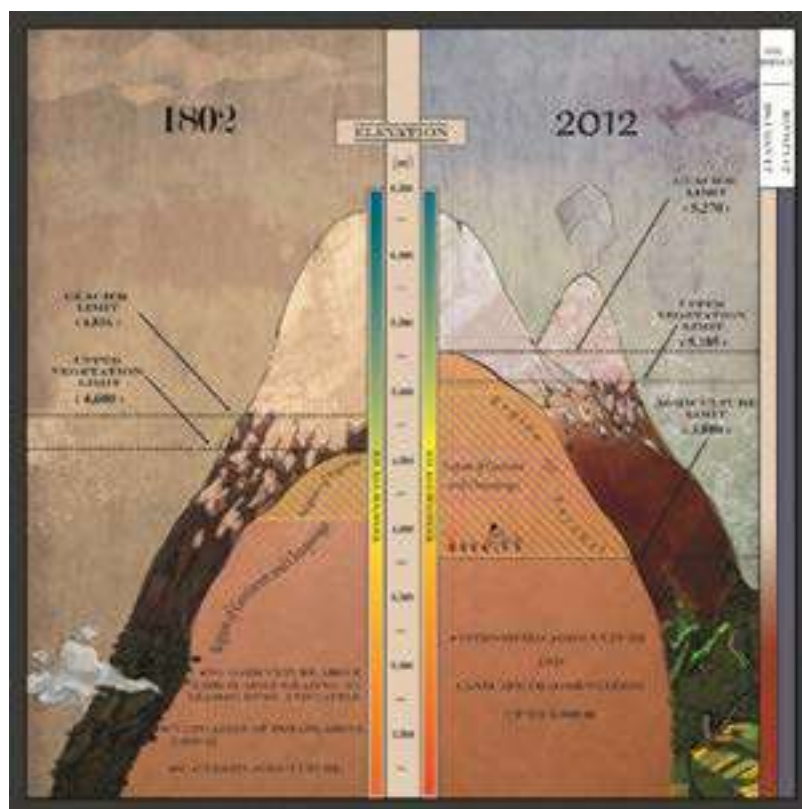
29 Rosa, R., A. Marques, and M.L. Nunes, *Impact of climate change in Mediterranean aquaculture*. Reviews in Aquaculture, 2012. 4(3): p. 163-177.

30 Moore, F.C. and D.B. Lobell, *The fingerprint of climate trends on European crop yields*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015. 112(9): p. 2670-2675.

31 Moriondo, M., C. Giannakopoulos, and M. Bindi, *Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation*. Climatic Change, 2011. 104(3): p. 679-701.

32 Renner, S.S. and C.M. Zohner, *Climate Change and Phenological Mismatch in Trophic Interactions Among Plants, Insects, and Vertebrates*. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2018. 49(1): p. 165-182.
Carnicer, J., et al., *Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011. 108(4): p. 1474-1478.

Figura 14 • Actualización del Tableau de Humboldt.



Se muestra un resumen de los principales cambios en el límite general de la vegetación, el límite promedio de los glaciares y de la vegetación superior del Chimborazo de 1802 a 2012. El clima y el cambio de los usos del suelo, principales impulsores del cambio están representados por las barras de la derecha y muestran un impacto constante en altitud del cambio climático, en particular el aumento de la temperatura, un mayor impacto relativo de los usos del suelo en las zonas más bajas, principalmente a través de la intensificación de la agricultura, y el efecto de la recolección del pasto y las quemadas locales en zonas intermedias, mucho más altas que las zonas que antiguamente se cultivaban. La representación de los glaciares es aproximada.

Fuente: Morueta-Holme, N., et al., *Strong upslope shifts in Chimborazo's vegetation over two centuries since Humboldt*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015.

La pérdida de nicho climático está haciendo que muchas especies se vean amenazadas en los lugares que ocupaban hasta ahora. Las especies más frías están desplazándose hacia zonas más elevadas o a latitudes más septentrionales³³. Uno de los mejores ejemplos de los cambios sobre la vegetación y los hielos como consecuencia del cambio climático, unido a los cambios de uso del suelo, lo tenemos en la comparación del esquema altitudinal de la distribución de la vegetación, las zonas cultivadas y los glaciares realizado por Alexander von Humboldt y Aimé Bonpland en su ascensión al Chimborazo, Ecuador, en 1802, con la situación dos siglos más tarde. La precisión de las notas tomadas entonces ha permitido constatar claramente la ascensión de la vegetación y el retroceso de los glaciares, entre otros cambios (ver Figura 14). La reducción del

nicho climático es particularmente importante para especies de distribución reducida, poco abundantes o que habitan en islas (en sentido real o ecológico, como cumbres de montaña, suelos particulares, fragmentos aislados, etc.), en cuyo caso no tienen otras áreas para colonizar. Las invasiones de especies exóticas están aumentando debido a la mayor amplitud de nicho de estas especies³⁴. Los ecosistemas acuáticos vienen experimentando aumentos de temperatura que se unen a otros factores de estrés por eutrofización o disminución de caudales, entre otros, lo que está alterando la composición de las comunidades acuáticas³⁵.

33 Chen, I.-C., et al., *Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming*. Science, 2011. 333(6045): p. 1024-1026.
Morueta-Holme, N., et al., *Strong upslope shifts in Chimborazo's vegetation over two centuries since Humboldt*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015. 112(41): p. 12741-12745.

34 Seebens, H., et al., *Global rise in emerging alien species results from increased accessibility of new source pools*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018. 115(10): p. E2264-E2273.

35 Erol, A. and T.O. Randhir, *Climatic change impacts on the ecohydrology of Mediterranean watersheds*. Climatic Change, 2012. 114(2): p. 319-341.

Ecosistemas marinos y zonas costeras

Los organismos marinos se enfrentan a cambios en su fisiología como consecuencia del incremento de temperatura. Esto los lleva a buscar ambientes más propicios para poder subsistir. Se han observado desplazamientos generalizados de la biota marina, tanto en el fitoplancton como en el zooplancton o las especies que los depredan, en dirección norte o en profundidad, en busca de aguas más frías. La productividad marina está en descenso como consecuencia del aumento de la temperatura y la disminución del pH y de la concentración de oxígeno disuelto. Las zonas de hipoxia marina están aumentando³⁶. El aumento del nivel medio del mar pone en peligro la configuración de las líneas costeras, así como la estructura y función de los ecosistemas costeros que juegan un papel fundamental en disipar la energía de las olas o en la mitigación del clima³⁷. Esto pone en peligro algunas de las infraestructuras costeras y el recurso que sirve de base a la industria del turismo.

Salud humana

La salud humana viene estando amenazada directamente por el aumento de temperatura, en particular las olas de calor³⁸. Las mortalidades debidas a ellas aumentan cada año, siendo este uno de los eventos extremos climáticos que en mayor número de casos se ha podido atribuir al cambio climático. El efecto de las altas temperaturas depende estrechamente de la humedad relativa del aire. Cuanto mayor es esta, menor es la capacidad de refrigeración del cuerpo humano. Nuestra especie tiene un límite de tolerancia de 35 °C de bulbo húmedo. En algunas zonas del planeta, la temperatura así medida se ha más que duplicado en las últimas cuatro décadas, calculándose que con el cambio climático

La diferente sensibilidad de las plantas y sus herbívoros al calentamiento produce avances en la foliación y floración y retrasos en la caída de las hojas, lo que conduce a falta de sincronía de los herbívoros con las plantas que les sustentan y de éstos con sus depredadores, produciendo alteraciones en las poblaciones de unos y otros.

amplias zonas del mundo pueden llegar a hacerse inhabitables³⁹.

Otro de los impactos relacionados indirectamente con la temperatura es la mortalidad en las ciudades debido a la contaminación atmosférica. Las partículas <2,5 micrómetros que se forman en la combustión de los vehículos a motor o el ozono troposférico que se forma por la interacción de los gases de la combustión con la radiación solar son particularmente preocupantes. Se calcula que cada año mueren prematuramente en el mundo 3,3 millones de personas debido a la contaminación atmosférica, cifra que se prevé que se doble a mediados de siglo⁴⁰, una razón poderosa para mitigar el cambio climático. El hecho de que la forma de evadirse del calor sea usando aire acondicionado refuerza el efecto invernadero y agrava el calentamiento global, siendo un claro ejemplo de maladaptación.

El tercer elemento más importante del impacto del cambio climático sobre la salud humana es las enfermedades transmitidas por vectores. La expansión de estos vectores a zonas que antes no habitaban por tener un clima desfavorable para su biología está haciendo que las enfermedades que transmiten se asienten en zonas donde antes no estaban⁴¹. Esto es particularmente nocivo en

36 Bindoff, N.L., et al., *Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities*, in *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, H.-O. Pörtner, et al., Editors. 2019, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. p. 448-547.

37 Duarte, C.M., et al., *The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation*. *Nature Climate Change*, 2013. 3(11): p. 961-968.

38 Mora, C., et al., *Global risk of deadly heat*. *Nature Climate Change*, 2017. 7(7): p. 501-506.

39 Raymond, C., T. Matthews, and R.M. Horton, *The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance*. *Science Advances*, 2020. 6(19): p. eaaw1838.

40 Lelieveld, J., et al., *The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale*. *Nature*, 2015. 525(7569): p. 367-371.

41 Semenza, J.C. and J.E. Suk, *Vector-borne diseases and climate change: a European perspective*. *FEMS Microbiology Letters*, 2017. 365(2).

países con sistemas sanitarios débiles, que tienen dificultades para hacer frente a lo cotidiano⁴². Pandemias como la COVID-19 suponen un elemento de estrés que puede hacer olvidar los otros problemas sanitarios, agravándolos.

Sociedad

La distribución de la riqueza es desigual entre países y dentro de cada país, lo que hace que en todos los países existan grupos de marginalizados. Estos son más abundantes en los países desfavorecidos y menos numerosos en los más avanzados e igualitarios. Aun así, hay que ser conscientes de que en todos ellos existen grupos amplios de personas que no pueden hacer frente a las adversidades que afectan a sus medios de vida. De nuevo, la pandemia de la COVID-19 pone de relieve como esto es lamentablemente cierto. Las numerosas personas que hacen cola ante los bancos de alimentos para poder tener acceso a lo más básico es un buen reflejo de la desigualdad en nuestras sociedades, incluso en aquellas, como la española, que se encuentra entre las más igualitarias. Esto quiere decir que, ante eventos extremos de origen climático que afecten a los medios de subsistencia o produzcan desastres, esos grupos de personas vulnerables quedarán expuestos a sufrir privaciones⁴³.

Se ha especulado sobre el papel de la sequía que afectó a una buena parte de Siria en 2009 sobre el conflicto que azota a ese país, sequía que estuvo en parte provocada por el cambio climático⁴⁴. La falta de alimentos hizo que muchos agricultores

migraran a las ciudades en busca de un porvenir inexistente, con el consiguiente malestar social. Aunque esta visión ha sido contestada⁴⁵, lo que queda claro es que la migración es la última acción que les queda a los marginalizados cuando no pueden alimentarse y su futuro peligra. La migración trasciende las fronteras. Hemos visto como el sistema de acogida europeo tembló ante la llegada masiva de personas que huían del hambre, la falta de futuro y la guerra. Creo que sería más que prudente tener en cuenta estos avisos directos o indirectos del cambio climático y empezar a mitigarlo de forma contundente para evitar sus peores consecuencias.

La COVID19 nos ha mostrado la hercúlea tarea que tenemos por delante, habiéndose estimado que las emisiones de 2020 caerán en el mejor de los casos un 4 % si en junio de 2020 se recuperaba la normalidad o un 7 % si lo hace a finales de año⁴⁶. Para poder detener el calentamiento los límites establecidos por el Acuerdo de París, de aquí a mediados de siglo tendríamos que estar reduciendo las emisiones anuales en una magnitud algo inferior al peor de los escenarios de la COVID-19. Todo un reto. Por lo menos, nadie podrá decir que la ciencia no ha venido advirtiendo de la emergencia climática⁴⁷, para vergüenza de quienes pudieron y no hicieron lo que había que hacer, sabiendo que hacerlo evitará desgracias y beneficiará a toda la humanidad. No hablemos de quienes lo niegan para no actuar, esos son simplemente amorales.

42 Moreno, A.R., et al., *Salud humana, in Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos – Informe RIOCCADAP*, J.M. Moreno, et al., Editors. 2020, McGraw-Hill: Madrid, Spain. p. 651-697.

43 Olsson, L., et al., *Livelihoods and poverty, in Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* C.V. Field, et al., Editors. 2014, Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. p. 793-832.

44 Kelley, C.P., et al., *Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015. 112(11): p. 3241-3246.

45 Selby, J., et al., *Climate change and the Syrian civil war revisited*. Political Geography, 2017. 60: p. 232-244.

46 Le Quéré, C., et al., *Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement*. Nature Climate Change, 2020.

47 Hoegh-Guldberg, O., et al., *The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C*. Science, 2019. 365(6459): p. eaaw6974.



Dieter Gerten

Líder del grupo de trabajo y coordinador de Modelado de la Tierra en el Instituto de Potsdam para la Investigación del Impacto Climático (PIK), profesor de Climatología e Hidrología del Cambio Global, y miembro del Instituto de Investigación Integrativa THESys en Humboldt-Universität zu Berlin. Copresidente de un grupo de trabajo sobre Ciencia integrada del sistema terrestre de la Asociación Leibniz, miembro del Patronato de la Fundación ENTEGA y miembro del Comité Ejecutivo del Foro Europeo para el Estudio de la Religión y el Medio Ambiente. Más de 150 artículos de revistas y libros revisados por pares, autor colaborador del quinto informe de evaluación del IPCC (Grupo de trabajo II), editor de revisión del informe de evaluación del Panel de Cambio Climático de Austria y editor invitado o asociado de varias revistas científicas.

2.2 ¿Cuál es la contribución antropogénica al cambio climático y la superación de otros límites planetarios?

¿Cómo encaja el cambio climático en el contexto más amplio del sistema Tierra?

¿Cuál es la contribución antropogénica al cambio climático?

¿Cuáles son las causas de otras transgresiones de los límites planetarios?

¿Cómo debe integrarse la complejidad en el estudio del sistema climático?

¿Cómo encaja el cambio climático en el contexto más amplio del sistema Tierra?

La época actual del Antropoceno se caracteriza por varias presiones antropogénicas crecientes sobre el ecosistema terrestre⁴⁸. El cambio climático puede muy bien ser la más grave de estas presiones, ya que afecta a todo el planeta de formas multifacéticas, a largo plazo y potencialmente de una forma irreversible. Al mismo tiempo, sin embargo, otros efectos humanos, como una generalización en los cambios en el uso del suelo, el consumo excesivo del agua dulce y la contaminación por productos químicos, producen sus propios impactos, estrechamente entremezclados con los del cambio climático. Por ejemplo, en la actualidad, tres cuartas partes de la superficie de la Tierra han estado alteradas por la actividad humana, y hasta un tercio de la producción primaria neta potencial del suelo se destina a los alimentos, los piensos, la fibra, la madera y la energía. Como consecuencia, los ecosistemas acuáticos, terrestres y marinos, junto con la biodiversidad se degradan rápidamente⁴⁹. Estas realidades plantean la pregunta: ¿Cuánta resiliencia tiene

el sistema terrestre, y la civilización humana que lo habita, frente a estos cambios y alteraciones masivos?

El marco científico de los “límites planetarios” aborda la cuestión de la capacidad de recuperación a largo plazo de nuestro planeta, considerando para ello tanto los procesos más importantes del sistema terrestre (de los cuales el cambio climático es solo uno) como la importancia de las modificaciones que sufren, en un solo enfoque multidimensional⁵⁰. Su premisa central es que nueve procesos ambientales clave en conjunto regulan el funcionamiento y la estabilidad del sistema terrestre. Los nueve son: la reducción del ozono estratosférico, la pérdida de integridad de la biosfera (las extinciones y la pérdida de la biodiversidad), la contaminación química y la liberación de nuevas entidades, el cambio climático, la acidificación de los océanos, el consumo del agua dulce y el ciclo hidrológico global, los cambios en el sistema de tierra, los flujos de nutrientes (nitrógeno y fósforo) hacia la biosfera y los océanos, y la carga de aerosoles a la atmósfera. Para todos estos procesos, el marco sugiere estimaciones de dónde ubicar

48 Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L. et al. 2015a. The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. *Anthrop. Rev.* 2, 81–98.

49 IPCC 2020. *Climate Change and Land*. IPCC Secretariat.
IPBES (Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services) 2019. *Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES Secretariat.

50 Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475.
Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J. et al. 2015b. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855.

los límites planetarios (y los límites subglobales subyacentes) que garantizarían un margen suficiente para cambios críticos, graduales o abruptos, que pueden ocurrir si se traspasan los límites. La referencia para el estado “seguro” del sistema terrestre delimitado por los nueve límites planetarios es el Holoceno (es decir, los últimos ~11.700 años: después de la última Edad de Hielo). Según un principio de precaución, este estado se debe preservar en términos generales (en la medida en que la humanidad pueda influir sobre él), ya que las condiciones climáticas y otras condiciones biogeofísicas eran relativamente estables en el Holoceno, y especialmente porque este período fue la única condición conocida del sistema de la Tierra que permitió el desarrollo de la civilización humana con miles de millones de personas.

El límite planetario para el cambio climático se define como un nivel de concentración de CO₂ atmosférico de 350 ppm (y/o un cambio máximo en el forzamiento radiativo de +1 W/m²). Este valor es el extremo inferior de un rango de incertidumbre de 350–450 ppm, siguiendo la lógica que la Tierra estaba en gran parte libre de hielo hasta que la concentración de CO₂ cayó a 450 ppm ± 100 ppm⁵¹. Si bien no es directamente comparable, este límite está en línea con el objetivo de mitigación climática acordado internacionalmente de limitar el calentamiento global medio a <2 °C por encima del nivel preindustrial⁵². A su vez, este objetivo se basa en una gran cantidad de proyecciones que indican que los impactos se harán más generalizados y severos a medida que aumente la concentración de CO₂ atmosférico y que por lo tanto la temperatura y la precipitación cambien⁵³. Con una concentración actual de CO₂ atmosférico muy por encima del valor preindustrial de 280 ppm (en particular, 407 ppm de promedio durante el año 2018⁵⁴) y un

forzamiento radiativo de >2 W/m², se considera que el límite planetario del cambio climático ya se ha sobrepasado, lo que aumenta el riesgo de impactos significativos y a gran escala. Del mismo modo, los cálculos sugieren que los límites planetarios para la integridad de la biosfera, los cambios en el sistema terrestre, y los flujos de nutrientes también se han sobrepasado, al igual que los límites subglobales para el uso del agua dulce. Pero hay que tener en cuenta que la mayoría de estos otros límites están por el momento definidos solo provisionalmente o que aún no se han definido valores globales.

El marco científico de los “límites planetarios” aborda la cuestión de la capacidad de recuperación a largo plazo de nuestro planeta, considerando para ello tanto los procesos más importantes del sistema Tierra (de los cuales el cambio climático es solo uno) como la importancia de las modificaciones que sufren, en un solo enfoque multidimensional.

¿Cuál es la contribución antropogénica al cambio climático?

Desde su aparición, el planeta Tierra ha experimentado fluctuaciones climáticas sustanciales y a veces bastante bruscas, regidas por factores externos (astronómicos) e internos. Por ejemplo, durante los últimos tres millones de años ha habido ciclos de periodos de glaciación y periodos interglaciales, siendo el Holoceno un período interglacial. Recientemente, sin embargo, la concentración de CO₂ atmosférico ha alcanzado un nivel sin precedentes en los últimos 800.000 años y posiblemente incluso en los

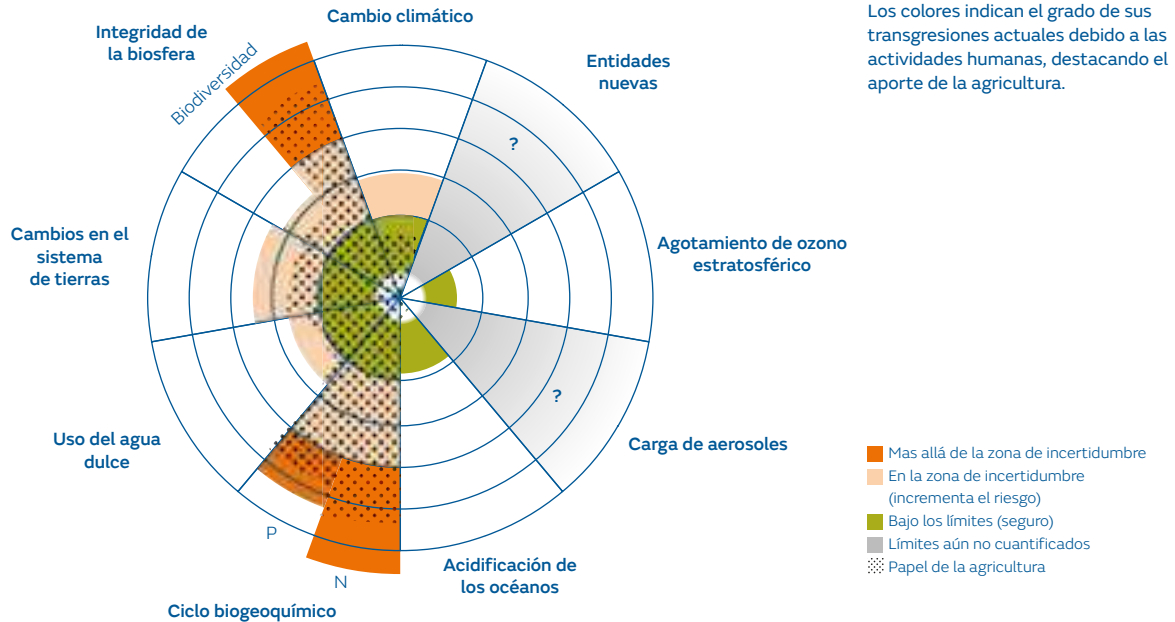
51 Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475.

52 Mathias, J.-D., Anderies, J.M., Janssen, M.A. 2017. On our rapidly shrinking capacity to comply with the planetary boundaries on climate change. *Sci. Rep.* 7, 42061.

53 Rückamp, M., Falk, U., Frieler, K. et al. 2018. The effect of overshooting 1.5 °C global warming on the mass loss of the Greenland ice sheet. *Earth Syst. Dynam.* 9, 1169–1189.
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2019. *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report*. IPCC Secretariat.

54 Friedlingstein, P., Jones, M.W., O’Sullivan, M. et al. 2019. Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 1783–1838.

Figura 15 • Nueve procesos ambientales claves regulan juntos el funcionamiento y la estabilidad del sistema Tierra.



Fuente: De Campbell et al. (2017) modificado después de Steffen et al. (2015b). Campbell, B.M., Beare, D.J., Bennett, E.M. et al. 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecol. Soc.* 22(4), 8. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J. et al.

últimos 23 millones de años⁵⁵, en sincronía con un aumento rápido y fuerte de la temperatura superficial media mundial, ahora ~1 °C por encima del nivel preindustrial.

Los procesos volcánicos, geotérmicos, solares o con otros orígenes naturales se han descartado como causa de este fuerte aumento reciente de temperatura, ya que sus contribuciones son marginales si no opuestas (producirían un ligero enfriamiento⁵⁶). Por lo tanto, las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O) y los clorofluorocarbonos (CFCs) son el factor más importante que determina el calentamiento global contemporáneo. La razón es que estos gases (como el vapor de agua y el ozono) absorben energía de longitudes de onda específicas y la irradian de nuevo a la superficie de la Tierra. Su acumulación masiva en la atmósfera produce un desequilibrio energético del planeta, entre la radiación solar entrante y el

calor liberado al espacio, lo que eventualmente conduce al calentamiento. Los gases tienen diferentes potenciales de calentamiento global, es decir, el calor que absorben puede ser varias veces mayor que el absorbido por la misma masa de CO₂ (por ejemplo, el factor de potencial de calentamiento a lo largo de 100 años es 28-36 para el CH₄, 265-298 para el N₂O, e incluso mayor para los CFCs). Para estandarizar estas diferencias, los pesos o concentraciones de gases de efecto invernadero generalmente se expresan en equivalentes de dióxido de carbono (CO_{2eq}).

Las emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera por la combustión de combustibles fósiles, junto con la oxidación de todos los procesos energéticos e industriales y la producción de cemento, han estado aumentando notablemente desde alrededor de 1850 y se han convertido en los dominantes desde 1950; desde entonces, han aumentado aún más, hasta llegar a un valor actual (2009-2018) de 9,5 GtC/año ± 0,5 desviación estándar. Durante

55 Cui, Y., Schubert, B.A., Jähren, A.H. 2020. A 23 m.y. record of low atmospheric CO₂. *Geology* 48, 888-892.

56 Lockwood, M., Fröhlich, C. 2007. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. *Proc. R. Soc. A* 463, 2447-2460.

la última década, las emisiones han crecido un 1,3 %/año, con China y también India dominando la tendencia global y los estados miembros de la UE demostrando una cierta disminución. Un adicional $1,5 \pm 0,7$ GtC/año proviene de actividades humanas terrestres planificadas, incluida la deforestación y otros cambios en la cubierta y el uso del suelo (sin una tendencia global clara). Después de tener en cuenta los sumideros de carbono natural (véase más abajo), esto ha llevado a una tasa de crecimiento en la concentración atmosférica de $4,9 \pm 0,02$ GtC/año (o 2,3 ppm/año). Con respecto a la emisión total de gases de efecto invernadero, excluyendo el cambio en el uso del suelo, se estima que la agricultura contribuirá con un total de $\sim 5,0$ - $5,8$ Gt $\text{CO}_{2\text{eq}}$ /año (basado en una escala de tiempo de 100 años) equivalente al ~ 11 % de las emisiones antropogénicas totales de gases de efecto invernadero. Se pueden encontrar especificaciones detalladas de la distribución regional y nacional de emisiones de los diversos sectores, por ejemplo, en el *Global Carbon Budget*, actualizado anualmente o en los informes del IPCC⁵⁷.

Según esas evidencias, reducir fuertemente las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero en todos los sectores (por ejemplo, agricultura, construcción, finanzas, manufactura y transporte) es la medida principal para mitigar el cambio climático, junto con la eliminación de CO_2 de la atmósfera, por medios como la forestación o las plantaciones de biomasa. Las simulaciones muestran, por ejemplo, que el aumento medio de la temperatura global podría bajar a cero, 50 años después de reducir las emisiones de CO_2 a cero⁵⁸. Hay que tener en cuenta que, si bien la crisis del coronavirus puede producir involuntariamente (y temporalmente) la mayor caída anual en las emisiones de CO_2

Las emisiones antropogénicas de CO_2 a la atmósfera por la combustión de combustibles fósiles, junto con la oxidación de todos los procesos energéticos e industriales y la producción de cemento, han estado aumentando notablemente desde alrededor de 1850 y se han convertido en los dominantes desde más o menos 1950.

en 2020, es probable que aún esté algo por debajo de los recortes de emisiones necesarios anualmente esta década para limitar el calentamiento global a $<1,5$ °C⁵⁹).

Asimismo, una condición previa para que dicha descarbonización sea permanente y efectiva es que la Tierra siga siendo resistente a las retroalimentaciones no lineales (ver más abajo), y que se preserve el ciclo natural del carbono entre la atmósfera, los océanos y la tierra, así como los grandes “sumideros” netos naturales de carbono. Se estima que la biosfera terrestre y los océanos actualmente proporcionan un sumidero de $3,2 \pm 0,6$ GtC/año y $2,5 \pm 0,6$ GtC/año, respectivamente, lo que significa que capturan aproximadamente la mitad de las emisiones anuales de CO_2 ⁶⁰. Esto reafirma que debemos considerar el sistema climático en el contexto de la dinámica del sistema terrestre en su conjunto y de los límites planetarios.

¿Cuáles son las causas de otras transgresiones de los límites planetarios?

Varios estudios recientes han mejorado la cuantificación (especialmente detallada) de los límites planetarios y su estado actual⁶¹. Sin embargo, las contribuciones individuales de los

57 Blanco, G., Gerlagh, R., Suh, S. et al. 2014. Drivers, Trends and Mitigation. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 351–411. Cambridge University Press.

58 MacDougall, A.H., Frölicher, T.L., Jones, C.D. et al. 2020. Is there warming in the pipeline? A multi-model analysis of the Zero Emissions Commitment from CO_2 . *Biogeosci.* 17, 2987–3016.

59 Le Quéré, C., Jackson, R.B., Jones, M.W. 2020. Temporary reduction in daily global CO_2 emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Clim. Change* 10, 647–653.

60 Friedlingstein, P., Jones, M.W., O’Sullivan, M. et al. 2019. Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 1783–1838.

61 Véase Steffen et al., 2015b, y revisiones posteriores, por ejemplo, Gleeson et al., 2020 para agua dulce. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J. et al. 2015b. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855.

diferentes factores responsables de sobrepasar los límites aún no se han estudiado de manera tan sistemática y exhaustiva como sí se ha hecho en relación con el cambio climático; además, no se han seguido estrictamente las definiciones de límites actuales. Con respecto a la reducción del ozono estratosférico, el factor principal es la liberación de sustancias que destruyen el ozono (los CFCs), de modo que su prohibición, siguiendo las pautas del Protocolo de Montreal, ha revertido el quebrantamiento de los límites a través de una fuerte reducción en el tamaño del “agujero de la capa de ozono” antártica. Tal y como sucede con el cambio climático, la acidificación de los océanos es muy sensible a los niveles de CO₂ atmosférico, cuya absorción eventualmente causa acidificación, anoxia e impactos biológicos marinos. Para la carga de aerosoles y la liberación de nuevas entidades, ni siquiera se han cuantificado los valores de los límites planetarios, de modo que todavía no es posible identificar las causas de una posible superación (regional o global).

En cuanto a la superación de los límites planetarios terrestres, la agricultura, (especialmente la agricultura industrial y de uso intensivo de recursos en sus diversas formas) es con diferencia la causa más relevante, ya que se trata del principal impulsor de los cambios en el uso del suelo y la cubierta terrestre, de la liberación de nitrógeno y fósforo a los suelos y cuerpos de agua, y de la pérdida de la biodiversidad. Un estudio⁶² (ver Figura 15) ha recopilado evidencias de muchas fuentes diversas, que no se pueden comparar de manera directa, pero que aun así permiten una primera estimación de la contribución de la agricultura mundial al estado actual de los límites planetarios. Los autores informan que esta proporción puede ser de hasta el 80 %, con respecto al límite para los cambios en el sistema de tierra

Con respecto a la superación de los límites planetarios terrestres, la agricultura, (especialmente la agricultura industrial y de uso intensivo de recursos en sus diversas formas) es con diferencia la causa más relevante, ya que se trata del principal impulsor de los cambios en el uso del suelo y la cubierta terrestre, de la liberación de nitrógeno y fósforo a los suelos y cuerpos de agua, y de la pérdida de la biodiversidad.

(debido a la deforestación), tentativamente del 80 % con respecto a la integridad de la biosfera (pérdida de biodiversidad genética y funcional en los ecosistemas terrestres), del 84 % con respecto al consumo de agua dulce, y de aproximadamente el 85 % y más del 90 % con respecto al límite para los flujos de nitrógeno y fósforo, respectivamente. Las contribuciones comparativamente menores de factores distintos de la agricultura aún no se han calculado, pero podrían derivarse de estimaciones análogas. Por ejemplo, el 16 % restante del consumo de agua dulce proviene de los sectores industrial y doméstico, pero con patrones regionales distintos⁶³. Con respecto al estado del límite del cambio climático, la agricultura (incluidas las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas del cambio en el uso del suelo) aporta “solo” alrededor del 25 %.

Otros expertos⁶⁴ adoptan un enfoque complementario con un modelo que incluye una evaluación espacialmente detallada, considerando hasta qué grado la agricultura actual (año 2005) depende de las violaciones de los límites planetarios. Dichos autores sostienen que el 19 % de la producción de alimentos se perdería si se respetaran los límites para la integridad de la biosfera y los cambios en el sistema de tierra en cada bioma. Dicho de otro

Gleeson T., Wang-Erlandsson, L., Zipper, S.C., et al. 2020. The Water Planetary Boundary: Interrogation and Revision. *One Earth* 2, 223–234.

62 Campbell, B.M., Beare, D.J., Bennett, E.M. et al. 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecol. Soc.* 22(4), 8.

63 Wada, Y., de Graaf, I.E.M., van Beek, L.P.H. 2016. High-resolution modeling of human and climate impacts on global water resources. *J. Adv. Mod. Earth Syst.* 8, 735–763.

64 Gerten, D., Heck, V., Jägermeyr, J. et al. 2020. Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sust.* 3, 200–208.

modo, esta parte de la producción alimentaria depende de sobrepasar uno de estos dos límites en regiones donde los bosques y la biodiversidad deberían ser protegidos. Restringir el riego en áreas donde las extracciones de agua son más altas de lo permitido por el límite subglobal de agua dulce sería equivalente a una reducción adicional del 4 %, y restringir la aplicación de fertilizante nitrogenado en regiones que actualmente se encuentran por encima del límite (local) supondría otra reducción del 25 %.

En resumen, casi la mitad de la producción mundial de alimentos ocurre a costa de sobrepasar uno o más de estos cuatro límites planetarios (el estudio no analiza el cambio climático). Sin embargo, las diferentes regiones se ven afectadas de manera diferente: el uso excesivo de nitrógeno prevalece en partes de Europa, Estados Unidos y China, mientras los trópicos son puntos críticos de pérdida de integridad de la biosfera y cambios en el sistema de tierra, y las zonas subtropicales experimentan un uso excesivo de los recursos de agua dulce. En varias regiones, incluso dos o más límites se superan simultáneamente. Para respetar todos los límites planetarios y al mismo tiempo permitir el suministro de alimentos para alrededor de diez mil millones de personas serían necesarias transformaciones radicales hacia patrones de producción y consumo de alimentos más sostenibles: redistribución de áreas de producción, mejoras en la eficiencia del uso de agua y nutrientes, evitar las pérdidas de alimentos, y cambiar la composición de la dieta hacia menos productos animales⁶⁵.

¿Cómo debe integrarse la complejidad en el estudio del sistema climático?

En este capítulo se argumenta que las causas y consecuencias del cambio climático global

Para respetar todos los límites planetarios, y al mismo tiempo permitir el suministro de alimentos para alrededor de diez mil millones de personas, serían necesarias transformaciones radicales hacia patrones de producción y consumo de alimentos más sostenibles: redistribución de áreas de producción, mejoras en la eficiencia del uso de agua y nutrientes, evitar las pérdidas de alimentos, y cambiar la composición de la dieta hacia menos productos animales.

no deben verse de manera aislada. El sistema climático está estrechamente relacionado con la biosfera (terrestre), el ciclo del agua, los océanos y las masas de hielo a través de numerosos procesos y retroalimentaciones que pueden amplificar aún más el cambio climático, tal y como se representa a través del marco de los límites planetarios. Por ejemplo, el descongelamiento de los suelos de permafrost inducido por el calentamiento y la mayor actividad microbiana asociada probablemente conducirá a la liberación de grandes cantidades de CO₂ y CH₄ en la zona boreal. Mientras tanto, la disminución de las precipitaciones y de la humedad del suelo, y en particular las sequías, puede disminuir la capacidad natural de absorción de CO₂ de las plantas, que les proporciona el potencial de funcionar como un sumidero de carbono. De hecho, la muerte forestal inducida por el cambio climático en las regiones boreales y tropicales, junto con el deshielo del permafrost, puede incluso convertir la biosfera terrestre global en una fuente de carbono⁶⁶.

Tales cambios de régimen y puntos de inflexión altamente no lineales, que en el peor de los casos podrían convertirse en efectos dominó y descontrolados⁶⁷, se vuelven más probables

65 Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D. et al. 2018. Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* 562, 519–525.

Gerten, D., Heck, V., Jägermeyr, J. et al. 2020. Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sust.* 3, 200–208.

66 Schaphoff, S., Heyder, U., Ostberg, S. et al. 2013. Contribution of permafrost soils to the global carbon budget. *Environ. Res. Lett.* 8, 014026.

Peters, W., van der Velde, I.R., van Schaik, E. et al. 2018. Increased water-use efficiency and reduced CO₂ uptake by plants during droughts at a continental scale. *Nature Geosci.* 11, 744–748.

67 Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K. et al. 2018. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 115, 8252–8259.

cuanto más se sobrepasa los límites del cambio climático⁶⁸. Pero las superaciones de otros límites planetarios, particularmente a través de la deforestación para la producción de alimentos y piensos, aumentan el riesgo. Los “mega incendios” ocurridos recientemente en el Amazonas, Australia, California y Siberia indican una compleja interacción de las causas y los efectos del cambio climático, por un lado, (preparando el terreno para sequías intensas y olas de calor de larga duración que desencadenan los incendios, junto con la dinámica de la vegetación y también patrones de circulación oceánica anómalos o disminución de la cobertura de hielo marino), y intervenciones humanas más directas, por otro lado, especialmente la deforestación con la pérdida asociada de funciones y especies reguladoras del ecosistema⁶⁹. El círculo vicioso se complica aún más por el hecho de que las emisiones de carbono de los incendios y la disminución de la absorción de carbono como resultado de la quema de vegetación amplifican el cambio climático regional y global.

Los procesos, sus escalas temporales y las retroalimentaciones involucradas en estas dinámicas complejas y no lineales se entienden de manera incompleta, al igual que las interacciones entre los límites planetarios en general⁷⁰. Estudios más completos y consistentes siguen siendo un objetivo para la investigación, incluidas las evaluaciones sistemáticas de cómo sobrepasar un límite (como, por ejemplo, los diferentes niveles de calentamiento global) afecta al estado de otros límites. También es importante

La necesidad de una comprensión holística de la dinámica del sistema de la Tierra es clara: dado que las actividades humanas colectivas son la causa principal del cambio climático actual y otras superaciones de límites planetarios, es responsabilidad de nuestra civilización evitar una desestabilización peligrosa del planeta que compartimos.

examinar cómo las medidas para evitar que sobrepasemos los límites se oponen entre sí. Por ejemplo, las plantaciones de biomasa dedicadas a la eliminación de CO₂ pueden limitar la disponibilidad de agua dulce y suelo para otros fines⁷¹, o medidas para proteger la capa de ozono estratosférico y para reducir la contaminación del aire pueden tener efectos retrasados sobre el cambio climático⁷². Se necesitan escenarios para explorar la necesidad de sacrificar algunas cosas para salvaguardar otras, pero también sinergias y caminos para que la humanidad maniobre con seguridad dentro de los múltiples límites planetarios. La necesidad de una comprensión holística de la dinámica del sistema terrestre es clara: dado que las actividades humanas colectivas son la causa principal del cambio climático actual y otras superaciones de límites planetarios, es responsabilidad de nuestra civilización evitar una desestabilización peligrosa del único planeta que compartimos.

Lenton, T. M., Rockström, J., Gaffney, O. et al. 2019. Climate tipping points – too risky to bet against. *Nature* 575, 592–595.

68 Schellnhuber, H. J., Rahmstorf, S., Winkelmann, R. 2016. Why the right climate target was agreed in Paris. *Nature Clim. Change* 6, 649–653.

69 Brando, P., Macedo, M., Silvério, D. et al. 2020. Amazon wildfires: scenes from a foreseeable disaster. *Flora* 268, 151609.

Nolan, R.H., Boer, M.M., Collins, L. et al. 2020. Causes and consequences of eastern Australia's 2019–20 season of mega-fires. *Global Change Biol.* 26, 1039–1041.

Zhang, W., Döscher, R., Koenig, T. et al. 2020. The interplay of recent vegetation and sea ice dynamics – results from a regional Earth system model over the Arctic. *Geophys. Res. Lett.* 47, e2019GL085982.

70 Lade, S., Steffen, W., de Vries, W. et al. 2020. Human impacts on planetary boundaries amplified by Earth system interactions. *Nature Sust.* 3, 119–128.

71 Heck, V., Gerten, D., Lucht, W., Popp, A. 2018. Biomass-based negative emissions difficult to reconcile with planetary boundaries. *Nature Clim. Change* 8, 151–155.

72 Kaniaru, D., Shende, R., Stone, S. et al. 2007. Strengthening the Montreal Protocol: insurance against abrupt climate change. *Sust. Dev. Law Pol.* 3–9, 74–76.
Ramanathan, V., Feng, Y. 2008. On avoiding dangerous anthropogenic interference with the climate system: formidable challenges ahead. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105, 14245–14250.



Rafael Borge

Trabaja de la UPM desde 2001. Dirige el Laboratorio de Modelización Ambiental en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, centrado en el desarrollo y aplicación de modelos de emisiones y de simulación numérica de la calidad del aire; fundamentalmente en base a modelos eulerianos fotoquímicos de mesoescala. Científico visitante en la Universidad de Harvard desde 2018. Consultor de UN Habitat, miembro del Scientific Advisory Committee del consorcio internacional Healthy Polis y miembro de la Ponencia Técnica de la Comisión de la Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid y del Comité Científico-Técnico sobre Cambio Climático de la Comunidad de Madrid. Coordina el programa de investigación AIRTC-CM, orientado a desarrollar nuevos métodos de medición y modelización de la calidad del aire y la exposición, tanto a contaminantes abióticos como bióticos, en un contexto de clima cambiante.

2.3 ¿Cuáles son las grandes incertidumbres en la medición y predicción?

¿Cómo sabemos que el clima está cambiando?

¿Qué métodos se utilizan para medir el cambio?

¿Qué tipos de modelos climáticos se aplican?

¿Cómo calibrar la fiabilidad de un modelo climático?

¿Cómo se puede gestionar la incertidumbre?

¿Cuáles son las principales recomendaciones?

¿Cómo sabemos que el clima está cambiando?

Podemos evaluar tendencias en base a los datos de programas de observación de la Tierra y estudios científicos que publican series históricas de indicadores relevantes sobre el estado del sistema climático. Indicadores como la composición de la atmósfera, temperatura, superficie de los mantos de hielo, etc., permiten evaluar tendencias a largo plazo. Con esa información se suelen estimar valores medios para determinados periodos temporales (con su correspondiente intervalo de confianza) y anomalías, o desviaciones respecto a periodos de referencia suficientemente largos, normalmente un mínimo de 30 años. Teniendo en cuenta la multiplicidad de fenómenos involucrados y sus interacciones, no es posible confirmar el cambio climático a partir de un único indicador. No obstante, todas las bases de datos independientes apuntan a que la temperatura está subiendo desde 1900, según se indica en capítulos previos. Esta tendencia es consistente con el incremento en la concentración de sustancias químicas en la atmósfera que absorben radiación de onda larga (gases de

efecto invernadero, GEI), el retroceso de los glaciares, la reducción de la cubierta de nieve y la elevación del nivel del mar.

.....

Teniendo en cuenta la multiplicidad de fenómenos involucrados y sus interacciones, no es posible confirmar el cambio climático a partir de un único indicador. No obstante, todas las bases de datos independientes apuntan a que la temperatura está subiendo desde 1900.

.....

Uno de los grandes retos de caracterizar el cambio climático desde el punto de vista científico se relaciona con las escalas espacio-temporales asociadas a los procesos de interés. Por ejemplo, la mayor parte del forzamiento radiativo en la atmósfera se relaciona con los GEI de vida larga⁷³. Esto implica que existe un desfase temporal de varias décadas entre la reducción de emisiones de estas sustancias y la respuesta del sistema climático. El cambio climático además depende de factores naturales tales como la modulación de los ciclos solares que se asocia a escalas temporales aún mayores.

73 IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Por lo tanto, es necesario analizar los cambios en el clima bajo una perspectiva a largo plazo, considerando amplios periodos de tiempo tanto en el pasado como en el futuro.

En este contexto, las observaciones directas o remotas del sistema climático (compuesto de atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera) son esenciales para la ciencia climática. Sin embargo, observaciones fiables a escala global sólo están disponibles a partir de mediados del siglo XIX y sólo para las variables más básicas como la temperatura a nivel de superficie. Datos derivados de observaciones de satélite y otras mediciones indirectas que son de gran utilidad para estudiar el clima están disponibles desde hace muy poco tiempo.

Ante esta limitación, las técnicas de simulación se erigen como una herramienta esencial para desentrañar el funcionamiento del complejo sistema climático. Además, los modelos son nuestra única alternativa para predecir el futuro y anticipar el resultado de las decisiones que tomemos (o dejemos de tomar) en la actualidad. No obstante, la tarea no es sencilla. Por un lado, estamos intentando predecir la evolución futura de fenómenos que no tienen precedentes en la historia. Por otro lado, la evolución del clima tiene unas implicaciones de enorme calado desde el punto de vista de la salud pública y de la economía⁷⁴. Por lo tanto, cuantificar y comunicar adecuadamente el grado de certidumbre en relación a la evolución pasada y futura del clima es una prioridad para la comunidad científica.

¿Qué métodos se utilizan para medir el cambio?

La compilación de series de datos históricas consistentes y comparables entraña una gran dificultad. Las mediciones utilizadas para estudiar el cambio climático proceden de una gran variedad de redes de vigilancia que, en la mayoría de los casos, no fueron diseñadas para observar el clima. Además, las técnicas de medición y los procedimientos experimentales en general han evolucionado a lo largo del tiempo. Esto implica la necesidad de procesar los datos en crudo proporcionados por los instrumentos de medida antes de realizar análisis de series temporales de largo plazo. Por lo tanto, la incertidumbre en las observaciones tiene típicamente dos componentes:

- la incertidumbre asociada al dato en sí (debido a las limitaciones de precisión de los instrumentos, errores de lectura, reubicación de puntos de muestreo, cambios en los métodos experimentales, etc),
- y la incertidumbre asociada al pre-procesado de los datos (corrección, interpolación, promediado, etc).

Pese a que las fuentes de incertidumbre pueden generalizarse de este modo, la especificidad de cada tipo de observación impide que se puedan proponer métodos unificados universalmente válidos para detectar datos erróneos, sesgos y para evaluar la incertidumbre total de las mediciones. Esto dificulta la comparabilidad de la información obtenida de distintas bases de datos históricas y hace imposible eliminar por completo influencias que no se deban exclusivamente al cambio climático⁷⁵.

Ante la carencia de un método estandarizado para cuantificar la incertidumbre, se han

74 Watts, N., Adger, W.N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., Chaytor, S., Colbourn, T., Collins, M., Cooper, A., Cox, P.M., Depledge, J., Drummond, P., Ekins, P., Galaz, V., Grace, D., Graham, H., Grubb, M., Haines, A., Hamilton, I., Hunter, A., Jiang, X., Li, M., Kelman, I., Liang, L., Lott, M., Lowe, R., Luo, Y., Mace, G., Maslin, M., Nilsson, M., Oreszczyn, T., Pye, S., Quinn, T., Svensdotter, M., Venevsky, S., Warner, K., Xu, B., Yang, J., Yin, Y., Yu, C., Zhang, Q., Gong, P., Montgomery, H., Costello, A., 2015. Health and climate change: policy responses to protect public health. *Lancet* 386, 1861–1914. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60854-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60854-6)

Van Vuuren, D.P., van der Wijst, K., Marsman, S., van den Berg, M., Hof, A.F., Jones, C.D., 2020. The costs of achieving climate targets and the sources of uncertainty. *Nat Clim Chang* 10, 329–334. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0732-1>

75 Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, 2013: Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

adoptado marcos analíticos que pueden ayudar a generar la confianza necesaria en las tendencias observadas. Fundamentalmente, consisten en el análisis de distintas bases de datos independientes de una misma variable y otras variables que dada su relación física, se espera tengan un comportamiento similar. Por ejemplo, las tendencias de temperatura a nivel de superficie publicadas en el último informe de síntesis del IPCC (AR5)⁷⁶ se basan en cuatro bases de datos independientes que en conjunto recogen observaciones de casi 60.000 estaciones meteorológicas distribuidas por todo el planeta. Cada una de ellas cuenta con sus propios procedimientos de verificación y control de calidad y considera distintos métodos de promediado espacial y temporal.

Esta variedad de aproximaciones metodológicas en la reconstrucción de series temporales permite al IPCC evaluar la incertidumbre estructural asociada al marco analítico más que de la incertidumbre específica del parámetro en sí. Para cada una de las bases de datos se ajustan tendencias decenales (típicamente lineales) mediante procedimientos como el ajuste por mínimos cuadrados, comúnmente utilizados en análisis de regresión estadística. Los intervalos de confianza se calculan a partir de la varianza de la muestra (desviaciones de las observaciones respecto a la línea ajustada). Este método no considera la incertidumbre de las observaciones (incertidumbre paramétrica) que contiene cada base de datos pero proporciona un marco homogéneo para el análisis de tendencias. En el caso concreto de la temperatura en superficie, analizada en detalle en el capítulo 2.2, las tendencias lineales (y su intervalo de confianza al 90 %) para el periodo 1979-2012 varían entre 0,254 ($\pm$ 0,050) °C/década y 0,273 ($\pm$ 0,047) °C/década. Considerando que el análisis está basado en bases de datos de calidad y gran volumen, hay una evidencia

muy robusta del incremento de temperatura. Adicionalmente, el hecho de que todas las tendencias muestren valores muy similares sugiere que es virtualmente cierto que la temperatura del aire a nivel de superficie se ha incrementado en ese periodo.

Ante la carencia de un método estandarizado para cuantificar la incertidumbre, se han adoptado marcos analíticos que puedan ayudar a generar la confianza necesaria en las tendencias observadas. Fundamentalmente, consisten en el análisis de distintas bases de datos independientes de una misma variable y otras variables que dada su relación física, se espera tengan un comportamiento similar.

De forma similar, hay un nivel de confianza muy alto en que la concentración de los GEI incluidos en el Protocolo de Kioto se ha incrementado entre 2005 y 2011, especialmente el CO₂, que presentaba un nivel de 390,5 ppm (390,3-390,7) en 2011; un 40 % más que en 1750⁷⁷. También podemos afirmar con mucha certeza que la abundancia global de los gases regulados por el Protocolo de Montreal (sustancias perjudiciales para la capa de ozono estratosférica) está disminuyendo. En relación a la criosfera, se puede afirmar que la superficie media anual del hielo marino del Ártico está disminuyendo.

Por el contrario, la falta de suficiente información, la distribución geográfica heterogénea de las observaciones y/o inconsistencias en las tendencias regionales impiden evaluar la tendencia de otras variables relevantes con alto grado de confianza. Según el IPCC, existe una alta incertidumbre en las observaciones y tendencias globales de nubosidad, sequías, temperatura en las capas

76 IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

77 Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, 2013: Observations: Atmosphere and Surface. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

inferiores del océano o el grosor y el volumen de hielo en la Antártida.

¿Qué tipos de modelos climáticos se aplican?

El estudio del cambio climático incluye un amplio rango de aplicaciones que van desde la reconstrucción paleoclimática hasta la predicción climática local a corto plazo, lo que requiere combinar muy diversos tipos de modelos matemáticos. Entre las herramientas de modelización que la comunidad científica ha desarrollado, hay tres tipos que son particularmente importantes desde el punto de vista de la toma de decisiones ya que son capaces de dar respuestas a preguntas esenciales para el desarrollo de políticas, tales como la cantidad de emisiones de CO₂ compatible con un determinado objetivo de estabilización climática⁷⁸. Se trata de modelos deterministas basados en la descripción de los principios físicos que rigen el complejo sistema climático de acuerdo a nuestro conocimiento actual del mismo. Dicho de otro modo, son representaciones simplificadas de los procesos dinámicos e interacciones que finalmente determinan el forzamiento radiativo neto en la atmósfera y, en consecuencia, la evolución del clima.

Los modelos de circulación general atmósfera-océano (MCGAO) constituyen la base de la investigación climática. Son modelos globales (el dominio de modelización es el planeta entero) que resuelven los procesos dinámicos estrechamente acoplados de la atmósfera y el océano. Los modelos del sistema Tierra (ESM) son una evolución de los MCGAO en los que se han añadido explícitamente los ciclos biogeoquímicos (por ejemplo: los ciclos del carbono, el ozono o el azufre) para ofrecer una descripción acorde al conocimiento científico

actual de las interacciones (transferencia de materia y energía) entre todos los componentes del sistema climático (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera). Típicamente tienen una resolución espacial del orden de 1 ° (unos 111 km en el Ecuador); es decir, las ecuaciones dinámicas se resuelven en puntos que representan un área horizontal de 1 °x1 °. Eso implica que es imposible representar explícitamente cualquier fenómeno que se verifique a una escala espacial menor (por ejemplo sistemas nubosos de desarrollo convectivo).

Entre las herramientas de modelización que la comunidad científica ha desarrollado, hay tres tipos que son particularmente importantes desde el punto de vista de la toma de decisiones, ya que son capaces de dar respuestas a preguntas esenciales para el desarrollo de políticas, tales como la cantidad de emisiones de CO₂ compatible con un determinado objetivo de estabilización climática.

Los procesos que tienen una escala característica inferior a la resolución del modelo se incluyen a través de parametrizaciones que son aproximaciones numéricas simplificadas de todos los procesos no incluidos en las ecuaciones dinámicas. Tales procesos son determinantes para discernir la evolución del clima en un punto concreto, ya que características locales como la topografía o los usos del suelo tienen una gran influencia. Esto es cierto también para otras características atmosféricas locales como la calidad del aire⁷⁹. Para profundizar en estos procesos de escala regional o local se usa el tercer tipo de modelos, los modelos climáticos regionales (RCM). Los

78 Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen, 2013: Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

79 Fiore, A.M., Naik, V., Spracklen, D. V, Steiner, A., Unger, N., Prather, M., Bergmann, D., Cameron-smith, P.J., Cionni, I., Collins, W.J., Dalsren, S., Eyring, V., Folberth, G.A., Ginoux, P., Horowitz, L.W., Josse, B., Lamarque, J., Mackenzie, I.A., Nagashima, T., O'connor, F.M., Righi, M., Rumbold, S.T., Shindell, D.T., Skeie, R.B., Sudo, K., Szopa, S., Takemura, T., Zeng, G., 2012. Global air quality and climate. Chem. Soc. Rev. 41, 6663–6683. <https://doi.org/10.1039/C2CS35095E>

RCM son modelos de área limitada (en contra de lo que sucede con los MCGAO o ESM, se aplican en dominios de modelización limitados, es decir, tienen fronteras) que tienen una formulación matemática similar a los MCGAO (aunque habitualmente obvian la interacción entre la atmósfera con el océano) pero con una resolución espacial mucho mayor (unos pocos kilómetros). Estos modelos son muy útiles para incrementar la resolución de las simulaciones globales, proceso conocido como *downscaling* dinámico, y poder estudiar la evolución del clima a escala local⁸⁰.

Pese a que la separación es difusa, se acepta en general que la incertidumbre de los modelos puede descomponerse en una parte estructural u óptica y otra epistémica. La primera se refiere a los límites intrínsecos en la predictibilidad⁸¹ de sistemas caóticos (aquellos extremadamente sensibles a las condiciones iniciales, típicamente el sistema climático) y que, por tanto, es irreducible. La segunda hace referencia a la incertidumbre introducida por un conocimiento imperfecto del fenómeno modelizado y, por tanto, es posible reducirla a través de una mejor formulación o mejores datos. Existen distintas metodologías para cuantificar las fuentes de incertidumbre y valorar la fiabilidad de los modelos numéricos, valorando finalmente el orden de magnitud de la incertidumbre global de los resultados. Todas ellas tienen importantes limitaciones, lo que imposibilita validar en sentido estricto modelos complejos como estos. Sin embargo, estas técnicas contribuyen a determinar la capacidad de diagnóstico y pronóstico de los modelos⁸².

¿Cómo calibrar la fiabilidad de un modelo climático?

En principio, el mejor modo de calibrar la fiabilidad de un modelo consiste en comparar sus predicciones con valores observados (concentración de CO₂ en la atmósfera, anomalías térmicas, elevación media global del nivel del mar, etc.). Es importante valorar no solo la capacidad de reproducir fielmente los valores o estados medios, sino también las tendencias, la variabilidad y los valores extremos de una determinada magnitud. En ese sentido, los modelos climáticos usados por el IPCC han demostrado tener cada vez un mejor comportamiento⁸³. La comparación de sus predicciones en el periodo 1980-2005 arroja desviaciones del orden de ± 2 °C para la temperatura media a nivel de superficie en la mayor parte de las regiones del mundo, mientras que errores absolutos de precipitación anual media son inferiores a los 3,5 mm/día. Las correlaciones espaciales para la temperatura y precipitación son del orden del 0,99 y 0,80, respectivamente. Los modelos climáticos globales actuales son capaces de reproducir de forma precisa fenómenos complejos tales como aquellos que determinan la extensión media del manto de hielo en el Ártico con un error inferior al 10 % en cualquier temporada del año. La evaluación de las capacidades de un modelo dado en base a las diferencias entre los valores predichos y observados aporta información relevante en cuanto a la precisión esperable de sus resultados. Sin embargo, los modelos pueden proporcionar resultados precisos debido a compensaciones de errores u otras razones espurias. Adicionalmente, las condiciones que se den en el futuro no tienen que estar necesariamente dentro del rango de las condiciones observadas en el pasado,

80 Jacob, D.J., Winner, D.A., 2009. Effect of climate change on air quality. *Atmos. Environ.* 43, 51–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>

81 Held, I., 2014. Simplicity amid Complexity. *Science* (80) 343, 1206–1207. <https://doi.org/10.1126/science.1248447>

82 Dennis, R., Fox, T., Fuentes, M., Gilliland, A., Hanna, S., Hogrefe, C., Irwin, J., Rao, T., Scheffe, K., Schere, K., Steyn, D., Venkatram, A., 2010. A framework for evaluating regional-scale numerical photochemical modeling systems. *Environ Fluid Mech* 10, 471–489. <https://doi.org/10.1007/s10652-009-9163-2>

83 Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen, 2013: Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

sobre las que se ha evaluado su fiabilidad. Estas circunstancias, limitan el valor predictivo de los modelos⁸⁴.

Para intentar proporcionar una visión global sistemática e informativa de la incertidumbre de los modelos climáticos, los informes de síntesis del IPCC se apoyan en el grupo de trabajo de modelos acoplados (WGCM) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP). Dicho grupo de trabajo ha organizado una serie de ejercicios de inter-comparación de modelos de clima acoplados (CMIP), desde el CMIP3 que dio soporte al AR4 al actual CMIP6, aún en curso⁸⁵. El último informe de síntesis del IPCC (AR5) se basa en los resultados del CMIP5 en el que participaron cerca de 40 EMS distintos. Más que centrarse en la evaluación individual de estos modelos, estos ejercicios de inter-comparación proporcionan los resultados del ensamble (predicción conjunta) de proyecciones climáticas, que es particularmente informativo para la definición de políticas.

En lugar de intentar simular todos los posibles escenarios futuros, todos los modelos se aplican sobre unos pocos escenarios predefinidos que representan referencias de interés a nivel práctico (por ejemplo, las recientes trayectorias de concentración representativas, RCP⁸⁶). Pese a que todos los modelos se basan en los mismos principios físicos, diferencias en las parametrizaciones, resolución y otros detalles de implementación hacen que en algunos casos, exista un amplio rango de resultados⁸⁷. El promedio y la varianza calculados a partir de los resultados de cada modelo permiten

El mejor modo de calibrar la fiabilidad de un modelo consiste en comparar sus predicciones con valores observados. Es importante valorar no solo la capacidad de reproducir fielmente los valores o estados medios, sino también las tendencias, la variabilidad y los valores extremos de una determinada magnitud.

calcular un intervalo de confianza para el conjunto del ensamble. Así pues, aunque los modelos son de naturaleza determinista, la caracterización de la incertidumbre es de tipo probabilística. Debe notarse que esta técnica, muy extendida, incluye distintas aproximaciones que incluyen los ensambles multi-modelo, donde se comparan salidas de distintos códigos, y los ensambles basados en perturbaciones; es decir, se comparan salidas de un mismo modelo con distinta configuración o distintos datos de entrada. Esto permite identificar la sensibilidad de los modelos y contribuye a cuantificar la incertidumbre epistémica, lo que informa a su vez de futuras líneas de investigación para seguir mejorando nuestras herramientas diagnósticas y predictivas.

Los análisis del IPCC y otros estudios coinciden en que, a pesar de mejoras recientes (por ejemplo las interacciones de especies químicas específicas dentro del aerosol atmosférico y la consideración explícita de las emisiones de azufre), la incertidumbre relacionada con las interacciones entre nubes y partículas y la cuantificación de su forzamiento radiativo es aún muy elevada⁸⁹. La mejora de la estimación

84 Strobach, E., Bel, G., 2020. Learning algorithms allow for improved reliability and accuracy of global mean surface temperature projections. *Nat Commun* 11, 451. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14342-9>

85 Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

86 van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C., Hurtt, T. Kram, V. Krey, J. F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith, Rose, S.K., 2011. The Representative Concentration Pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

87 Strobach, E., Bel, G., 2020. Learning algorithms allow for improved reliability and accuracy of global mean surface temperature projections. *Nat Commun* 11, 451. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14342-9>

88 Holden, P.B., Edwards, N.R., Ridgwell, A., Wilkinson, R.D., Fraedrich, K., Lunkeit, F., Pollitt, H., Mercure, J.-F., Salas, P., Lam, A., Knobloch, F., Chewpreecha, U., Viñuales, J. E., 2018. Climate–carbon cycle uncertainties and the Paris Agreement. *Nature Clim Change* 8, 609–613. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0197-7>

89 Fiore, A.M., Naik, V., Spracklen, D. V, Steiner, A., Unger, N., Prather, M., Bergmann, D., Cameron-smith, P.J., Cionni, I., Collins, W.J., Dalsren, S., Eyring, V., Folberth, G.A., Ginoux, P., Horowitz, L.W., Josse, B., Lamarque, J., Mackenzie, I.A., Nagashima, T., O'connor, F.M., Righi, M., Rumbold, S.T.,

del forzamiento radiativo ejercido por ciertas fracciones del aerosol atmosférico (partículas orgánicas secundarias o carbono elemental) así como algunos GEI es considerada un aspecto crítico. Se estima que sólo las inconsistencias asociadas al cálculo del forzamiento radiativo del CO₂ pueden ser responsables de la mitad de la incertidumbre de las predicciones de temperatura, típicamente acotadas en el rango de 1,5 a 4,5 °C⁹⁰.

¿Cómo se puede gestionar la incertidumbre?

En contra de lo que sucedía en el pasado⁹¹, la consideración explícita de la incertidumbre es hoy un objetivo básico de la comunidad científica a la hora de comunicar sus hallazgos y recomendaciones a los responsables políticos. Según se ha ilustrado anteriormente con el ejemplo de las tendencias de temperatura a nivel de superficie, el IPCC basa su evaluación de la incertidumbre en dos factores: evidencia y acuerdo. En base a estos parámetros, los equipos de científicos responsables de los informes de síntesis proporcionan un resumen cualitativo de la probabilidad de que un determinado hallazgo, conclusión o aseveración sea cierta (desde virtualmente cierta, con más de un 99 % de probabilidad, hasta excepcionalmente improbable, con menos de un 1 % de probabilidad)⁹². Aunque esta aproximación

permite comunicar el grado de certeza de forma consistente, aún implica cierta cantidad de juicios cualitativos y puede no reflejar perfectamente el concepto de acuerdo científico dentro de los grupos de trabajo del IPCC.

Más allá de consideraciones de tipo teórico, debe tenerse presente que las incertidumbres asociadas al proceso de cambio climático no se limitan al cálculo del forzamiento radiativo y sus consecuencias sobre cada uno de los componentes del sistema climático. Consideraciones más amplias en el contexto de la adaptación, valoración de daños, aspectos socio-económicos y económicos pueden expandir considerablemente esta incertidumbre⁹³. Sin embargo, es preciso también tener en cuenta los co-beneficios asociados a la lucha contra el cambio climático.

Las emisiones antropogénicas son un input particularmente relevante para las proyecciones climáticas. Según el IPCC, las emisiones acumuladas de CO₂ (este GEI representa aproximadamente el 85 % del total del forzamiento antropogénico en todos los RCP) son el factor determinante de cara a estimar el calentamiento global para finales del siglo XXI en adelante.

Shindell, D.T., Skeie, R.B., Sudo, K., Szopa, S., Takemura, T., Zeng, G., 2012. Global air quality and climate. *Chem. Soc. Rev.* 41, 6663–6683. <https://doi.org/10.1039/C2CS35095E>

Held, I., 2014. Simplicity amid complexity. *Science* (80) 343, 1206–1207. <https://doi.org/10.1126/science.1248447>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

Boucher, O., D. Randall, P. Artaxo, C. Bretherton, G. Feingold, P. Forster, V.-M. Kerminen, Y. Kondo, H. Liao, U. Lohmann, P. Rasch, S.K. Satheesh, S. Sherwood, B. Stevens and X.Y. Zhang, 2013: Clouds and Aerosols. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

90 Soden, B.J., Collins, W.D., Feldman, D.R., 2018. Reducing uncertainties in climate models. *Science* (80) 361, 326–327. <https://doi.org/10.1126/science.aau1864>

91 Ha-Duong, M., Swart, R., Bernstein, L., Petersen, A., 2007. Uncertainty management in the IPCC: Agreeing to disagree. *Global Environmental Change* 17 (1), 8–11. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.12.003>

92 Mastrandrea, M.D., C.B. Field, T.F. Stocker, O. Edenhofer, K.L. Ebi, D.J. Frame, H. Held, E. Kriegler, K.J. Mach, P.R. Matschoss, G.-K. Plattner, G.W. Yohe and F.W. Zwiers, 2010: Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, 4 pp

93 Glanemann, N., Willner, S.N., Levermann, A., 2020. Paris Climate Agreement passes the cost-benefit test. *Nat Commun* 11, 110. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13961-1>

Las **emisiones antropogénicas** son un input particularmente relevante para las proyecciones climáticas. Según el IPCC, las emisiones acumuladas de CO₂ (este GEI representa aproximadamente el 85 % del total del forzamiento antropogénico en todos los RCP) son el factor determinante de cara a estimar el calentamiento global para finales del siglo XXI en adelante.

Las emisiones dependen tanto de factores socio-económicos como de la posible puesta en marcha de medidas y políticas. En general no es posible predecir la evolución de dichas variables, por lo que los análisis estratégicos se basan en la definición de escenarios de referencia que representan patrones de evolución genéricos de las variables de actividad y de los factores tecnológicos y legislativos. De este modo, el IPCC trabaja con una serie de escenarios que pretenden reflejar distintos patrones de conducta y evolución futura. En el último informe de síntesis (AR5), la mayor parte de las simulaciones realizadas dentro del CMIP5 se basaban en valores prescritos de concentración media de CO₂ en la atmósfera en lugar de valores de emisión prescritos. Pese a que esto es interesante para analizar escenarios políticos, los modelos tienen a predecir mayores concentraciones de CO₂ y, consecuentemente, mayor forzamiento radiativo cuando se prescriben emisiones de CO₂ que cuando se prescriben concentraciones atmosféricas de esta sustancia. Algunos investigadores sugieren que trabajar con valores fijos de concentración de CO₂ (lo que implica ignorar la realimentación del ciclo del carbono) introduce una gran incertidumbre bajo escenarios que asumen reducciones intensas de emisiones antropogénicas, ya que precisamente la respuesta del sistema climático al cambio de emisiones (ciclo del carbono) puede explicar casi el 50 % de la incertidumbre de la estimación del calentamiento máximo futuro.⁹¹

Además de evitar la creciente inequidad social a escala global⁹⁴, las políticas climáticas pueden reportar beneficios en relación a la propagación de vectores de enfermedades, inseguridad alimentaria y eventos meteorológicos extremos⁹⁵. Otros factores importantes, como la calidad del aire, sugieren que la acción por el clima constituye una política beneficiosa independientemente de la incertidumbre asociada. Pese a que la relación entre cambio climático y calidad del aire es muy dependiente de las condiciones locales⁹⁶, las simulaciones de RCM indican que un incremento de temperatura en regiones altamente contaminadas, en general se traducirá en valores máximos más altos de ozono y partículas finas, incrementando significativamente el impacto en salud de la contaminación atmosférica.

¿Cuáles son las principales recomendaciones?

Nuestro conocimiento del sistema climático dista mucho de ser perfecto, pero la evidencia proporcionada por los datos y modelos actuales indica que el calentamiento del sistema climático es inequívoco y que, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados carecen de precedentes en los últimos decenios a milenios⁹⁷.

Es preciso seguir investigando para cubrir los huecos en el conocimiento y para mejorar aún más nuestras capacidades en el ámbito de la medición y la modelización. Se están desarrollando nuevos conceptos y marcos teóricos para conciliar la respuesta de los modelos con las observaciones en áreas críticas

94 Diffenbaugh, N. S., Burke, M., 2019. Global warming has increased global economic inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 116 (20), 9808-9813. <https://doi.org/10.1073/pnas.1816020116>

95 Watts, N., Adger, W.N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., Chaytor, S., Colbourn, T., Collins, M., Cooper, A., Cox, P.M., Depledge, J., Drummond, P., Ekins, P., Galaz, V., Grace, D., Graham, H., Grubb, M., Haines, A., Hamilton, I., Hunter, A., Jiang, X., Li, M., Kelman, I., Liang, L., Lott, M., Lowe, R., Luo, Y., Mace, G., Maslin, M., Nilsson, M., Oreszczyn, T., Pye, S., Quinn, T., Svensdotter, M., Venevsky, S., Warner, K., Xu, B., Yang, J., Yin, Y., Yu, C., Zhang, Q., Gong, P., Montgomery, H., Costello, A., 2015. Health and climate change: policy responses to protect public health. *Lancet* 386, 1861–1914. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)60854-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)60854-6)

96 Borge, R., Requía, W.J., Yagüe, C., Jhun, I., Koutrakis, P., 2019. Impact of weather changes on air quality and related mortality in Spain over a 25 year period [1993–2017]. *Environ. Int.* 133, 105272. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105272>

97 IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

tales como las interacciones entre aerosoles y nubes o la cuantificación de ajustes rápidos del sistema climático. Es fundamental apoyarse en los avances de la ciencia climática, la mejora de nuestros sistemas de computación y del planteamiento de experimentos más exhaustivos y mejor orientados para resolver las preguntas aún pendientes en relación al extremadamente complejo sistema climático. Además de un mejor conocimiento científico de los procesos relevantes, nuevas técnicas de análisis estadístico, por ejemplo métodos de ensamble avanzados, pueden ayudar a reducir incertidumbres que perduran en la historia de las simulaciones climáticas⁹⁸. También pueden contribuir a este objetivo metodologías novedosas para adaptar los resultados de estas simulaciones en el contexto de aplicaciones específicas⁹⁹.

Todas las actuales limitaciones no deberían ser un argumento para frenar las políticas climáticas.

Además de evitar la creciente inequidad social a escala global, las políticas climáticas pueden reportar beneficios en relación a la propagación de vectores de enfermedades, inseguridad alimentaria y eventos meteorológicos extremos. Otros factores importantes, como la calidad del aire, sugieren que la acción por el clima constituye una política beneficiosa independientemente de la incertidumbre asociada.

De acuerdo a estudios recientes, los objetivos del Acuerdo de París aún son técnicamente viables, además de económicamente favorables. Asimismo, los co-beneficios asociados a un futuro descarbonizado abogan claramente por la lucha contra el cambio climático a pesar de todas las incertidumbres que tenemos en el presente.

98 Fletcher, S., Lickley, M., Strzepek, K., 2019. Learning about climate change uncertainty enables flexible water infrastructure planning. *Nat Commun* 10, 1782. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09677-x>

Nowack, P., Runge, J., Eyring, V., Haigh, J.D., 2020. Causal networks for climate model evaluation and constrained projections. *Nat Commun* 11, 1415. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15195-y>

Shortridge, J.E., Zaitchik, B.F., 2018. Characterizing climate change risks by linking robust decision frameworks and uncertain probabilistic projections. *Climatic Change* 151, 525–539. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2324-x>

99 Lehner, F., Wood, A.W., Vano, J.A., Lawrence, D.M., Clark, M.P., Mankin, J.S., 2019. The potential to reduce uncertainty in regional runoff projections from climate models. *Nat. Clim. Chang.* 9, 926–933. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0639-x>



Asunción Lera St-Claire

Científica Principal Superior en *DNV GL Group Technology and Research*, Asesora Sénior del Centro de Supercomputación de Barcelona y miembro del Consejo de la Misión para la Adaptación al Cambio Climático y la Transformación Social de la Comisión Europea. Filósofa y socióloga, tiene más de 25 años de experiencia en investigación orientada a soluciones sobre las dimensiones humanas y éticas de los desafíos globales con un enfoque en el desarrollo sostenible. Sus investigaciones actuales se centran en tecnologías digitales de confianza y en aprovecharlas para transformaciones equitativas hacia la sostenibilidad, la coproducción de servicios climáticos, la transferencia de conocimientos y la comunicación científica.

Miembro de la Future Earth Advisory Board, asesora de *Sustainability in the Digital Age Initiative* y miembro del Comité Asesor de la Universidad de Bonn. Su trabajo ha contribuido al desarrollo de la agenda de ciencias sociales del Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU) para cambio global. Autora Principal del Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC para el Grupo de Trabajo II sobre Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad, y Representante de Empresas e Industrias en el Proceso de Examen Técnico del Comité de Adaptación de la CMNUCC (de 2016 a 2018).

Antes de unirse a DNV GL, Asun fue profesora de sociología en la Universidad de Bergen, Noruega, y directora de investigación del Oslo Centre for Climate Research-CICERO.

2.4 ¿Podemos y debemos adaptarnos al cambio climático?

¿En qué consiste la adaptación al cambio climático?

¿Cuál es la expresión científica dominante con respecto a la adaptación?

¿Cuál ha de ser el cambio transformativo? Los dos lados de la resiliencia climática.

¿Qué importancia tiene la dimensión social y humana de la transformación?
El corazón del cambio climático.

Las opciones de adaptación, ¿son las mismas en todo el planeta?

¿En qué consiste la adaptación al cambio climático?

Hemos estado conviviendo con los impactos del cambio climático durante bastante tiempo. Las inundaciones, los incendios forestales, los huracanes y las tormentas tropicales más frecuentes e intensas, las olas de calor, la desertificación o los deslizamientos de tierra son ejemplos de las consecuencias de un planeta que se está calentando. Estos impactos tienen consecuencias importantes para los sistemas sociales y económicos, añaden presión adicional a la degradación ambiental ya existente, como la deforestación, y exacerban las vulnerabilidades socioeconómicas previas como la pobreza y la discriminación o la falta de acceso a los recursos naturales, como el agua, por ejemplo. El cambio climático, aunque es un fenómeno global, no impacta el vacío sino en contextos y localidades específicas. Todo esto conduce a conjuntos complejos de riesgos socioecológicos en cascada que pueden llevar al límite sistemas que se encuentran en puntos de inflexión peligrosos.

No hay absolutamente ninguna duda que debemos adaptarnos al cambio climático. Pero, ¿en qué consiste dicha adaptación, exactamente? ¿Cuán urgente es y cómo podemos llevarla a cabo? En todo esto no hay consenso científico. La adaptación al cambio climático es un proceso de cambio

La adaptación al cambio climático es un proceso de cambio transformador que puede variar en profundidad y velocidad, y que es difícil de desacoplar de otros procesos de transformación social más amplios. Al mismo tiempo, muchos temen que demasiada atención a la adaptación al cambio climático distraiga nuestra atención de la tarea mucho más importante de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

transformador que puede variar en profundidad y velocidad, y que es difícil de desacoplar de otros procesos de transformación social más amplios. Al mismo tiempo, muchos temen que demasiada atención a la adaptación al cambio climático distraiga nuestra atención de la tarea mucho más importante de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

En este breve ensayo, sostengo que necesitamos ambas perspectivas en un equilibrio que funcione tanto a escala global como local. En primer lugar, presento un breve resumen del trabajo científico enfocado en la adaptación al cambio climático, para luego describir las tendencias clave mientras proporciono ejemplos de acciones de adaptación exitosas e indico posibles trayectorias basadas en una atención especial a las dimensiones sociales y humanas del cambio.

¿Cuál es la posición científica dominante con respecto a la adaptación?

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático IPCC, por su nombre en inglés, que coordina la literatura científica relevante para comprender y resolver el cambio climático, dedica cada vez más atención al papel de la adaptación¹⁰⁰. Esta mayor atención ha surgido porque los impactos climáticos observados y su naturaleza destructiva demuestran que la gestión tradicional del riesgo de desastres es insuficiente para comprender y prepararnos para los riesgos inevitables del cambio climático. El enfoque en la adaptación también surge a medida que nuestra comprensión del sistema terrestre muestra que existe un desfase temporal sustancial entre la emisión de gases de efecto invernadero y las consecuencias visibles que estos tienen al alterar el clima. Esto significa que los verdaderos efectos de las emisiones emitidas recientemente aún no se han observado y, aunque hay muchas incertidumbres con respecto a cómo o cuándo se manifestarán exactamente en el futuro cercano, existe un trabajo científico sólido que demuestra su potencial naturaleza catastrófica¹⁰¹.

El Grupo de Trabajo encargado de abordar la adaptación dentro del IPCC enmarca el concepto, en su última evaluación publicada llamada AR5, en relación con la comprensión de los riesgos del cambio climático y las vulnerabilidades de los sistemas sociales y biofísicos a los impactos climáticos. Las tareas clave de este grupo de trabajo del IPCC en su último ciclo de evaluación incluyeron analizar cómo están cambiando los patrones de riesgos y beneficios potenciales. El cambio climático implica “interacciones complejas y probabilidades cambiantes de diversos

Los impactos climáticos observados y su naturaleza destructiva, demuestran que la gestión tradicional del riesgo de desastres es insuficiente para comprender y prepararnos para los riesgos inevitables del cambio climático.

impactos”¹⁰². El informe evaluó las necesidades, las opciones, las oportunidades, las limitaciones, la resiliencia, los límites y otros aspectos asociados con la adaptación. El enfoque principal en el riesgo fue elegido como una forma de apoyar la toma de decisiones en el contexto del cambio climático, y la adaptación se definió, como es de esperar, dentro de los límites de un marco de gestión de riesgos como “el proceso de ajuste al clima real o esperado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación busca moderar o evitar daños, o explotar oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima esperado y su efecto”¹⁰³.

Aunque el próximo ciclo de evaluación del IPCC, el AR6, no presentará sus resultados hasta los finales de 2021, la estructura del informe del grupo de trabajo de adaptación muestra más preocupación por la sostenibilidad real de los sistemas a medida que los impactos aumentan en profundidad y extensión.¹⁰⁴

El concepto de los “límites a la adaptación” se ha explorado en el AR5, donde se reconoce que la adaptación no siempre es posible porque en algún momento los “objetivos del agente (o las necesidades del sistema) no pueden, a través de acciones adaptativas, protegerse de riesgos intolerables”¹⁰⁵. Entre las soluciones para los límites de adaptación están la migración, y las perspectivas que ven el cambio necesario

100 Para información general sobre el mandato y trabajo del IPCC, véase <https://www.ipcc.ch/>

101 Steffen, W. Johan Rockström, Katherine Richardson, Timothy M. Lenton, Carl Folke, Diana Liverman, Colin P., 2018.

102 IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1–32..

103 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-AnnexII_FINAL.pdf

104 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/AR6_WGII_outlines_P46.pdf

105 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-AnnexII_FINAL.pdf

ya no como incremental, sino transformativo. La adaptación transformacional transmite la necesidad de velocidad y escala en el cambio de procesos asociados con la adaptación a un clima cambiante que son diferentes de la perspectiva de cambio incremental. Muchos autores han desarrollado este concepto de adaptación transformadora haciendo conexiones directas al cambio sistémico, y también abordando las causas subyacentes que mantienen a las sociedades en escenarios de altos niveles de emisiones y proporcionando explicaciones convincentes del papel clave que desempeñan los sistemas sociales y las relaciones sociales en una adaptación exitosa.

¿Cuál ha de ser el cambio transformativo? Los dos lados de la resiliencia climática

El uso central del concepto de riesgo como enfoque principal para entender la adaptación y para apoyar la toma de decisiones que propuso el IPCC en su última evaluación se ha convertido en una característica clave de muchas investigaciones y acciones sobre la adaptación al cambio climático. Yo mantengo que, aunque el lenguaje del riesgo es fundamental para concienciar e integrar los riesgos climáticos junto con otros riesgos en el trabajo de los agentes públicos y privados, también ha provocado que se defina la problemática de manera demasiado restringida: demasiado centrada en la evaluación cualitativa de los peligros y las pérdidas, creando puntos ciegos para las dimensiones sociales y humanas del cambio ambiental global, que, en mi opinión, proporcionan la solución para producir el cambio necesario.

Una de las ventajas importantes de enmarcar la adaptación como un proceso transformador de cambio es que abre muchas oportunidades para buscar procesos no lineales como elementos centrales de las estrategias de adaptación. Esto también afecta los tipos de acciones

adaptativas que se considera. La tendencia a ver la adaptación al cambio climático como una solución tecnológica, ya sea mediante la construcción de diques para evitar el aumento del nivel del mar o el uso de cultivos resistentes al agua, por ejemplo, tienden a centrarse en acciones a corto plazo y, a menudo, carecen de un análisis adecuado de sus consecuencias a largo plazo. El surgimiento de soluciones basadas en la naturaleza, como la restauración de los manglares como forma de proteger los medios de vida de las inundaciones y el aumento del nivel del mar, ha demostrado que el uso de ecosistemas naturales no solo es más efectivo que los ladrillos y el mortero contra los impactos relacionados con el clima, sino que también tiene importantes efectos y beneficios secundarios. En este caso, la investigación ha demostrado que restaurar los manglares protege la cultura, beneficia las relaciones de género, tiene una huella de carbono reducida y genera ingresos adicionales para la población local¹⁰⁶.

Una de las ventajas importantes de enmarcar la adaptación como un proceso transformador de cambio es que abre muchas oportunidades para buscar procesos no lineales como elementos centrales de las estrategias de adaptación. Esto también afecta los tipos de acciones adaptativas que se considera.

En el contexto de los países en desarrollo, estas formas sinérgicas y transformadoras de construir la capacidad de adaptación son de suma importancia. Cuando la respuesta adaptativa al clima es un cambio transformador, esto abre una gama de opciones de políticas novedosas, nos obliga a ver la naturaleza sistemática de las causas y de las soluciones para un planeta en calentamiento, y arroja luz sobre la importancia central que tienen la ética, la cultura, y los aspectos relacionados con el valor como claves para impulsar un cambio efectivo¹⁰⁷.

106 Resurrección, B.P., Bee, B.A., Dankelman, I., Park, C.M.Y., Halder, M., & McMullen, C.P. (2019). "Gender-transformative climate change adaptation: advancing social equity" Background paper to the 2019 report of the Global Commission on Adaptation. Rotterdam and Washington, DC. Available online at www.gca.org.

107 Pelling, M., O'Brien, K. & Matyas, D. 2015. Adaptation and transformation. *Climatic Change* 133, 113–127. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene

Las respuestas adaptativas diseñadas desde esa perspectiva transformadora pueden provocar cascadas de cambio positivo. Esto es crítico en el contexto de países que ya están experimentando un grave déficit en el acceso a servicios básicos, conflictos o múltiples formas de discriminación. Es urgente diseñar estrategias de adaptación que generen beneficios paralelos y eviten daños. El clima es un multiplicador de vulnerabilidades, capaz de crear trampas de pobreza, afectando negativamente a quienes más necesitan ayuda. Las respuestas adaptativas también pueden agravar las desigualdades, a menos que se evalúe cuidadosamente sus dimensiones sociales y humanas, asegurando que no conduzcan a una mala adaptación ni generen consecuencias negativas, en particular para aquellos sectores de las sociedades que son más vulnerables y tienen menos voz.

¿Qué importancia tiene la dimensión social y humana de la transformación? El corazón del cambio climático

Para avanzar con una agenda de investigación, innovación y acción para la adaptación al cambio climático, un punto de partida clave son las dimensiones sociales y humanas de la transformación. En un artículo que escribimos para la revista *Nature* hace unos años, mis compañeros y yo argumentamos que si no reformulamos los problemas relacionados con el cambio ambiental global desde una perspectiva social y humana, las respuestas serán demasiado pequeñas para la escala del problema, llegarán tarde para los enormes riesgos que ya enfrentamos hoy y serán potencialmente ciegas a las consecuencias negativas¹⁰⁸.

Las personas y las sociedades no son externas al cambio climático, sino son la causa del aumento de las emisiones de GEI y también la solución.

Sin embargo, parece que seguimos percibiendo los problemas causados por los humanos y que dañan a los humanos “en términos de su naturaleza biofísica, como cuestiones de moléculas, cambios en la dinámica atmosférica o interacciones del ecosistema, desequilibrios en los ciclos elementales o simplemente como sistemas ambientales que colapsan”¹⁰⁹. Esta parece una perspectiva bastante absurda, especialmente porque si la capacidad de los humanos y los sistemas sociales y económicos que hemos creado no se transforma, la adaptación ya no será posible dado que el clima nos transformará a nosotros, nos guste o no.

Las opciones de adaptación, ¿son las mismas en todo el planeta?

Es bien sabido entre los científicos del clima que el calentamiento debido a las emisiones antropogénicas persistirá durante milenios y continuará causando más cambios en el sistema climático. Esta perspectiva temporal es fundamental para comprender tanto la importancia como los límites de la adaptación. No solo nos enseña que la adaptación tendría que mantenerse durante mucho tiempo y tal vez incluso convertirse en una nueva normalidad en la vida de las generaciones futuras, sino que además cada incremento de un grado en la temperatura es importante para la cantidad de cambio al que tendríamos que adaptarnos o ser transformados a la fuerza.

La comunidad científica ha establecido que cualquier limitación al aumento de la temperatura media marcará una diferencia en cómo los humanos, los ecosistemas y todos los seres vivos experimentarán los impactos del cambio climático en los próximos años y décadas. El *Special Report* del IPCC publicado en 2018 describió las diferencias entre un planeta que se calienta no más de 1,5 °C por encima de

St.Clair, A.L. 2009. Climate Change and Poverty: The Responsibility to Protect, in O'Brien K., A. L. St. Clair, B. Kristoffersen (eds.), *Climate change, Ethics and Human Security*, Cambridge University Press.

108 Hackmann, H., Moser, S., and St.Clair, A.L. 2014. The Social at the Heart of Global Environmental Change; *Nature Climate Change*; V. 4. 1 August 2014. 665.

109 Hackmann et al., 2014: 654

Figura 16 • Las diferentes dimensiones de viabilidad hacia un límite del calentamiento de 1,5 °C.

La valoración de la viabilidad de diferentes opciones/acciones de adaptación y mitigación requiere consideraciones en 6 dimensiones.



Fuente: PF 4.1 (es parte del Capítulo 4) de IPCC, 2018: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)].

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf

los niveles preindustriales y un incremento de 2 °C, que es el objetivo del Acuerdo de París¹¹⁰.

En resumen, los riesgos son mayores y con mayor potencial para crear cascadas de efectos negativos. Esto significa que hay muchas posibilidades de adaptación que pueden reducir los riesgos del cambio climático si las temperaturas globales no superan este umbral de 2 °C¹¹¹. Claramente, las opciones de adaptación no son iguales en todo el planeta, también porque los impactos son locales y los medios globales no representan cambios iguales en diferentes regiones. Por ejemplo, las comunidades de montaña o los pueblos indígenas en el Ártico ya experimentan un calentamiento superior a 2 °C¹¹². Pero, en general, cada punto porcentual de un grado sí que es importante para las oportunidades de crear resiliencia a los sobresaltos creados por

Claramente, las opciones de adaptación no son iguales en todo el planeta, también porque los impactos son locales y los medios globales no representan cambios iguales en diferentes regiones.

un clima cambiante. La viabilidad de limitar el incremento en las temperaturas globales a 1,5 °C está determinada por dimensiones múltiples e interconectadas (ver Figura 16).

Sin embargo, la trayectoria de la economía mundial y los estilos de vida dominantes nos están llevando más allá de ese límite de 2 °C en unas pocas décadas, lo que plantea preguntas existenciales sobre el potencial de la vida en el planeta Tierra para los seres humanos, ya que nos hemos adaptado durante millones de años a

110 IPCC, 2018: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)].

111 Para un resumen detallado y muy informativo del Special Report, véase *Carbon Brief* <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-ipccs-special-report-on-climate-change-at-one-point-five-c>

112 Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A., and A.B. Shrestha (Eds.) 2019. The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People. Springer Open <https://lib.icimod.org/record/34383>

un clima relativamente estable que ya no existe. Esta perspectiva sombrea o las discusiones sobre los límites de la adaptación son menos comunes en los medios y en los debates políticos, pero en realidad son temas críticos a los que habría que prestar atención. Algunos científicos incluso opinan que ya hemos sobrepasado cualquier posibilidad de evitar cascadas de impactos catastróficos¹¹³. Otros prefieren apostar por la capacidad que tenemos los seres humanos para el cambio rápido¹¹⁴. La epidemia de la Covid19 ha demostrado al mundo que un cambio rápido es posible si hay incentivos suficientes. Evidentemente, las percepciones de los riesgos no son las mismas, ya que las epidemias son crisis inmediatas con consecuencias inmediatas. Sin embargo, la mayoría de los países podrían haber estado mucho mejor preparados para enfrentar la epidemia si las consecuencias

sociales y humanas se hubieran entendido mejor. La mayoría de los expertos advirtieron que ocurriría una epidemia global, la pregunta era cuándo iba a suceder, pero pocos habían previsto la gran perturbación social y económica asociada con una epidemia mundial.

Desatender los riesgos, por muy complejos y distantes que puedan ser, es la respuesta menos adaptativa a la emergencia climática. Yo diría que el campo de la adaptación a las necesidades del cambio climático, más que cualquier otra cosa, necesita la fertilización cruzada con las ciencias humanas y sociales. No solo necesitamos construir narrativas para expresar qué tipos de riesgos existenciales enfrentamos, sino que también necesitamos narrativas de esperanza y propósito.

TRAYECTORIAS DE ADAPTACIÓN ÓPTIMAS PARA UN CALENTAMIENTO INEVITABLE.

La naturaleza reflexiva de los seres humanos en términos de comprensión de los problemas y de sus soluciones ha sido una característica clave a lo largo de la historia y un importante motor para un cambio rápido y sostenido. No importa la raza, cultura, religión o ubicación geográfica, todas las sociedades tienen historias de agencia, debate y autorreflexión.

Ante un desafío que no tiene respuestas claras, que está lleno de peligros ocultos, de la necesidad de sacrificar algunas cosas para salvaguardar otras, y de consecuencias negativas no deseadas, los tipos correctos de estrategias de adaptación (incluida la que tal vez sea la adaptación más importante: cambiar drásticamente nuestras formas de vida para evitar nuevas emisiones) no son solo los que emergen de la ciencia. Se necesita urgentemente la autorreflexión individual sobre cómo contribuimos a las soluciones y una democracia deliberativa para resolver los desafíos y las prioridades. Creo que necesitamos tanto la autorreflexión como la democracia deliberativa para formar narrativas de esperanza y para idear trayectorias de adaptación óptimas para el calentamiento que ya no podemos evitar.

113 Steffen, W. Johan Rockström, Katherine Richardson, Timothy M. Lenton, Carl Folke, Diana Liverman, Colin P. Summerhayes, Anthony D. Barnosky, Sarah E. Cornell, Michel Crucifix, Jonathan F. Donges, Ingo Fetzer, Steven J. Lade, Marten Scheffer, Ricarda Winkelmann, and Hans Joachim Schellnhuber. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene Proceedings of the National Academy of Sciences Aug 2018, 115 (33) 8252-8259; DOI: 10.1073/pnas.1810141115.

114 Véase, por ejemplo, la obra de cChange que aboga por la transformación personal como forma importante de provocar otros tipos de cambio transformativo: <https://cchange.no/about/the-three-spheres-of-transformation/>





Kirsten Dunlop

PhD en Historia Cultural, su experiencia profesional abarca la academia, consultoría, banca, seguros, estrategia, diseño, innovación y liderazgo, trabajo que ha desarrollado en tres continentes. CEO de EIT Climate-KIC desde febrero de 2017, donde se incorporó procedente del conglomerado australiano de servicios financieros Suncorp. Miembro del grupo de expertos en *Economic and Societal Impact of Research and Innovation* (ESIR), que ofrece asesoramiento independiente sobre cómo la futura política de investigación e innovación de la UE puede respaldar mejor el desarrollo sostenible y las prioridades de la Von Der Leyen Commission.

Se dedica a moldear la innovación y a colocarla en una situación desde la cual puede catalizar un cambio sistémico profundo. Su visión para EIT Climate-KIC es la de ofrecer una capacidad de renovación, resiliencia y transformación sistémica, para lograr una economía de cero emisiones de carbono y una sociedad sin fragilidad ante el clima a través de la innovación.

En su papel en Suncorp, fundó y dirigió una división para gestionar y responder al riesgo estratégico a través de la innovación, transformando los modelos centrales de negocio y la industria desde dentro. Dirigió la *Generali Group Innovation Academy* para Assicurazioni Generali, siendo pionera en las ideas relacionadas con la propiedad en las áreas de gestión de riesgos estratégicos, innovación, desarrollo de liderazgo y cambio cultural.

2.5 ¿La mitigación del cambio climático va a transformar nuestro modelo socioeconómico?

¿Cuáles son los desafíos sistémicos más complejos que la humanidad afronta con el cambio climático?

¿Qué tipo de estrategias requiere este desafío sistémico del cambio climático?

¿Qué cambios estructurales tenemos que impulsar? La hora de la economía ecológica.

¿Cómo nos identificamos con el entorno natural? Hacia un nuevo manifiesto para la identidad humana.

¿Cuáles son los desafíos sistémicos más complejos que la humanidad afronta con el cambio climático?

Hacia finales de 2019, más de 11.000 científicos publicaron un aviso contundente de una emergencia climática en la revista *Bioscience*. Los firmantes declararon: “La crisis climática ha llegado y se está acelerando más rápido de lo que la mayoría de los científicos esperaban (...). Es más grave de lo previsto, y amenaza tanto ecosistemas naturales como el destino de la humanidad (...). Las reacciones en cadena podrían alterar significativamente los ecosistemas, la sociedad y las economías, potencialmente haciendo que grandes zonas de planeta Tierra sean inhabitables (...). *necesitamos transformaciones audaces y drásticas con respecto a las políticas económicas y de población.*”¹¹⁵

El cambio climático va camino de producir efectos catastróficos en la vida humana en la Tierra porque las acciones que estamos tomando para afrontarlo son demasiado pocas, se producen demasiado tarde y, lo más crítico de todo, resultan inapropiadas para la compleja

naturaleza sistémica del desafío. En este sentido, se puede definir un sistema como una colección de elementos conectados que funcionan conjuntamente. Por tanto, un sistema complejo es aquel que engloba múltiples interacciones entre muchos componentes diferentes. La complejidad de un sistema es una función de los elementos que están presentes, de sus interacciones y de los resultados relacionales y evolutivos que inducen. Un sistema complejo exhibirá propiedades emergentes caracterizadas por direcciones que no se puede proyectar.¹¹⁶ Debido a estas propiedades, los sistemas complejos desafían fundamentalmente nuestra capacidad de tomar decisiones y aumentan exponencialmente nuestra incertidumbre. El cambio climático y el colapso de la biodiversidad son los desafíos sistémicos más complejos que la humanidad afronta. Ocurren en los límites de nuestra capacidad de comprender, y mucho menos responder, a pesar de que nuestras acciones han causado y acelerado ambos.¹¹⁷ Para que podamos abordar uno y otro eficazmente, necesitamos cambiar significativamente la forma en que diseñamos y tomamos medidas.

115 <https://academic.oup.com/bioscience/advance-article/doi/10.1093/biosci/biz088/5610806>.

116 “Los sistemas complejos están compuestos de partes interconectadas que, en su conjunto, exhiben propiedades que no están presentes en las partes individuales por sí mismas y se caracterizan, en otras cosas, por: la imprevisibilidad, el surgimiento, el orden y el desorden simultáneos, la heterogeneidad, el caos, la no linealidad, los bucles de retroalimentación, y la histéresis”. Snyder, Carolyn W., et.al., “The Complex Dynamics of our Climate System: Constraints on our Knowledge, Policy Implications and the Necessity of Systems Thinking”, *Handbook of the Philosophy of Science*, Elsevier BV, 2011, Volumen 10, pp. 467-505.

117 W.Steffen, P.J. Crutzen & J.R.McNeill, *Ambio* 36, 614-621 (2007).

LOS PRINCIPALES EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PLANETA

Según el IPCC Special Report, para limitar el calentamiento a 1,5 °C necesitamos reducir las emisiones globales en un 45 % antes de 2030 y eliminar 1.000 GtCO₂ de la atmósfera antes de 2100, mediante sumideros terrestres de carbono, bioenergía acoplada con la captura y almacenamiento de carbono, y captura directa desde el aire. El IPCC señala que no se ha hecho nada en esta escala hasta la fecha, y se requerirá innovación y un compromiso excepcionales. Incluso si lo logramos, los riesgos relacionados con el clima para el crecimiento, los medios de vida, la salud, la seguridad alimentaria y el suministro de agua aumentarán comparado con los que experimentamos ahora. Pero si no logramos limitar el calentamiento a 1,5 °C, incluso si solo alcanzamos los 2 °C:

- La disminución en las pesquerías marinas con 2 °C de calentamiento será el doble de la que experimentaremos con 1,5 °C.
- Las cosechas de maíz caerán más del doble.
- Se reducirá tres veces más la distribución geográfica de los insectos, incluida la de los polinizadores.
- El nivel del mar aumentará otros 5 cm, y así otros 10 millones de personas estarán en una situación de riesgo.
- El número de personas que experimentan calor extremo con un calentamiento de 2 °C será el doble que con un aumento de 1,5 °C.

Pandemias como la actual crisis de la Covid-19 continuarán surgiendo con más frecuencia y tendrán un impacto mayor en sistemas sociales y económicos que ya son frágiles.

Las limitaciones a nuestro progreso hasta el momento se pueden atribuir a múltiples factores interrelacionados, pero destacan tres de los elementos más estructurales:

- Hemos abordado un problema sistémico, increíblemente complejo con estrategias y soluciones lineales y mecanicistas.
- Seguimos aceptando y perpetuando factores que de hecho son parte fundamental de las causas del problema.
- Tratamos al cambio climático como un problema exógeno no endógeno: seguimos evitando cambiarnos en nosotros mismos.

Para decirlo en otras palabras, en la lucha global contra el cambio climático, hemos dejado todos los problemas más difíciles para el final. Primero, hemos abordado los problemas esencialmente lineales de la sustitución de energía y la transición a las energías renovables: estos cambios ya están en marcha. Pero hemos dejado los problemas más peliagudos para el final: la transición, o más bien la transformación de los sistemas complejos que representan epicentros de las emisiones y la degradación ambiental, para la cual se requiere una innovación extraordinaria porque las soluciones verdaderamente transformadoras

no son obvias. Se puede identificar tales sistemas si se adopta una perspectiva en que ciudades enteras, cadenas de valor industriales, economías agrícolas regionales, mercados de capital y sistemas financieros son vistos como “problemas climáticos” complejos. Adoptando un pensamiento sistémico, observamos que los comportamientos de emisiones en estos dominios responden a las propiedades emergentes de relaciones complejas no lineales, que no se someten a las estrategias de resolución de problemas habituales basadas en paradigmas lineales. El desafío de hacer que tales sistemas sean neutros en carbono y ecológicamente benignos es enorme, y especialmente hacerlo a un ritmo mucho más grande que los impactos, inherentemente marginales, de nuestros esfuerzos durante las últimas tres décadas. En pocas palabras: no sabemos cuáles son las intervenciones requeridas. Y, por extensión, tampoco conocemos los requisitos de gastos de capital.

Lo que sí sabemos es que no será suficiente si continuamos trabajando a través de cambios graduales e incrementales. Lo que necesitamos ahora es una transformación fundamental de los sistemas económicos, sociales y financieros que

provoque un cambio exponencial en las tasas de descarbonización y fortalezca la “resiliencia climática” (la resistencia de la sociedad al cambio climático combinado con un incremento en la sostenibilidad). Esto es lo que el informe del IPCC llama “cambios rápidos, de largo alcance y sin precedentes en todos los aspectos de la sociedad”. Si queremos evitar los efectos catastróficos del cambio climático tal como se está desarrollando actualmente, necesitamos un cambio de paradigma importante en el modelo socioeconómico del mundo desarrollado e industrializado, y en la dinámica globalizada del mundo en desarrollo. Necesitamos que nuestro sistema humano (formado por muchos subsistemas anidados y diversos) cambie cómo se ve a sí mismo.

Para que surja una nueva identidad de nuestro modelo socioeconómico, el cambio debe ser de tal magnitud que altere el mismo tejido de lo que hace que ese modelo exista funcionalmente en la actualidad. Esto requeriría verdaderas “saltaciones” (mutaciones repentinas a gran escala) en los elementos constitutivos de los sistemas que lo componen, y en sus relaciones, para inducir discontinuidades en el tiempo y el espacio. La innovación es la clave: en todas las escalas y dimensiones, pero en el contexto de la creciente emergencia climática, la innovación y el diseño deben enfocarse en cambiar la forma en que los humanos se conciben a sí mismos en relación con el medio ambiente y entre sí. Esto representa un desafío importante y, al mismo tiempo, una oportunidad para la innovación en las políticas y la gobernanza. Como comenta Joanna Boehnert: “La humanidad ya tiene el conocimiento para hacer posibles en este planeta formas de vida sostenibles y socialmente justas. Lo que aún no tenemos es la capacidad de hacer posibles estas transiciones en el contexto político actual. Nuevos tipos de diseño y economía podrían formar la base de las transiciones sistémicas”.¹¹⁸

Lo que necesitamos ahora es una transformación fundamental de los sistemas económicos, sociales y financieros que provoque un cambio exponencial en las tasas de descarbonización y fortalezca la “resiliencia climática” (la resistencia de la sociedad al cambio climático combinado con un incremento en la sostenibilidad). Esto es lo que el IPCC llama “cambios rápidos, de largo alcance y sin precedentes en todos los aspectos de la sociedad”.

A continuación, propongo tres cambios de paradigma críticos en cómo abordamos el cambio climático para permitirnos sobrevivir, construir una habilidad endógena de “resiliencia” y efectuar una transformación de nuestro modelo socioeconómico tan profunda que nos permita vivir juntos de manera pacífica, equitativa, segura y sostenible.

¿Qué tipo de estrategias requiere este desafío sistémico?

A pesar de grandes inversiones, las actividades de mitigación del cambio climático siguen siendo demasiado fragmentadas e incrementales para permitir los cambios exponenciales necesarios.¹¹⁹ Muchos sectores, países y ciudades simplemente no pueden establecer objetivos que sean lo suficientemente ambiciosos como para garantizar el llamado mundo de 1,5 °C, porque no existen formas de llegar a ese punto de manera incremental. El problema radica en la manera en que establecemos nuestras expectativas y las herramientas que poseemos para considerar y responder a esas expectativas. Actualmente, enfocamos nuestras acciones climáticas en nuestras proyecciones de la respuesta de un sistema ordenado al “forzamiento antropogénico”, es decir, demasiados coches

118 <https://theconversation.com/surviving-climate-change-means-transforming-both-economics-and-design-109164>

119 En los últimos años en la UE, 25.000-30.000 millones de euros de financiación por año asociada con el clima ha logrado reducir las emisiones en un 22 %, con las reducciones más importantes en las industrias energéticas, el sector de la construcción y la fabricación. Véase Eurostat 2018 (pp. 71-2) <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/9087772/KS-02-18-728-EN-N.pdf/3f01e3c4-1c01-4036-bd6a-814dec66c58c>
La estrategia de la CE para el 2050, 2019 (pp. 15-16) <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/92f6d5bc-76bc-11e9-9f05-01aa75ed71a1/language-en>

que producen emisiones de CO₂, demasiados edificios con grandes huellas de carbono, vacas que producen demasiado metano, crecimiento exponencial en la aviación que depende de combustibles fósiles, demasiadas centrales eléctricas que queman carbón y demasiado carbón utilizado en la fabricación de acero, por ejemplo. Nuestras respuestas han seguido por el mismo camino: en su mayoría han sido de tipo sustitutorio, en última instancia orientadas a permitir que la vida humana y las aspiraciones del mundo desarrollado continúen sin grandes trastornos. Hemos buscado, por ejemplo, soluciones tecnológicas para cambiar las fuentes de energía hacia algo renovable o menos contaminante, e innovación para crear pienso para el ganado que reduce las emisiones de metano, para implementar mejoras en el procesamiento y el diseño en la aviación y la fabricación, y para introducir tecnologías de gestión de residuos que nos permiten reciclar y reutilizar.

Estas acciones también se caracterizan en gran medida por enfoques fragmentados de un “punto único”, generados dentro de los marcos de los diferentes sectores industriales y sus suposiciones. Están basadas en cálculos de emisiones agregadas en vez de contemplar y comparar diferentes rutas de emisión y sus interdependencias, a menudo resolviendo un problema de forma relativamente lineal y mecanicista en lugar de considerar una multitud de factores.¹²⁰ El objetivo de la compartimentación de los programas, de la financiación y de las formas de medir el éxito consiste en dar lugar a ganancias predecibles, confiables y, por lo tanto, en las que se pueda invertir. El resultado neto es una proliferación de iniciativas independientes, soluciones incrementales y mejoras en los procesos que han tenido muy poca efectividad contra el problema. Y, lo que es peor, han generado un conjunto de expectativas, hábitos y prácticas que se han convertido en establecidas, todo asociado con la sostenibilidad, que ahora nos impiden abordar el cambio climático como el desafío complejo que realmente es, como algo sistémico y que requiere una nueva definición de nuestro mundo.

Enfocamos nuestras acciones climáticas en nuestras proyecciones de la respuesta de un sistema ordenado al “forzamiento antropogénico”, es decir, demasiados coches que producen CO₂, demasiados edificios con grandes huellas de carbono, crecimiento exponencial en la aviación que depende de combustibles fósiles... Nuestras respuestas han seguido por el mismo camino: en su mayoría han sido de tipo sustitutorio, en última instancia orientadas a permitir que la vida humana y las aspiraciones del mundo desarrollado continúen sin grandes trastornos.

En los últimos 15 o 20 años, la innovación en el sector energético, por ejemplo, se ha centrado en soluciones de punto único y en el escalado comercial. El paradigma tradicional de la política de innovación consistía en apoyar la investigación y el desarrollo y los proyectos de ingeniería, y había cierta confianza en que el mundo sería capaz de innovar una salida de la crisis climática y, finalmente, encontrar una forma de desacoplar el crecimiento económico del crecimiento ambiental. Hoy en día, muchas de las victorias más fáciles (la sustitución parcial de la energía, incrementos de eficiencia, etc.) ya se han activado. El sector energético es el responsable de aproximadamente dos tercios de las emisiones globales de CO₂, y nos damos cuenta que los avances tecnológicos por sí solos no resolverán la crisis climática: las dos décadas de políticas de innovación centradas en la tecnología deben ser seguidas por un paradigma de innovación diferente. El apoyo a la innovación en el sector energético también debe ir de la mano de innovaciones sociales, políticas, económicas, financieras e institucionales. Además, si bien puede haber una vía emergente para la transición de los sistemas energéticos, los otros desafíos que quedan son mucho más difíciles, incluida la gestión territorial (y todos los sistemas relacionados) y los procesos y productos industriales (junto con los hábitos de los consumidores que los impulsan), que juntos representan el 45 % de las emisiones de GEI a nivel mundial.

¹²⁰ Snyder, Carolyn W., et.al., “The Complex Dynamics of our Climate System: Constraints on our Knowledge, Policy Implications and the Necessity of Systems Thinking”, *Handbook of the Philosophy of Science*, Elsevier BV, 2011, Volumen 10, pp. 467-505.

La naturaleza sistémica de la transformación que se necesita también tiene importantes consecuencias para las políticas públicas: necesitamos centrar la innovación y el cambio de políticas en los sistemas, no en sus partes individuales, siempre reconociendo la incertidumbre fundamental que resulta de intervenir en la dinámica de sistemas complejos. En este caso, la incertidumbre es aún mayor por el hecho de que los sistemas que requieren el cambio mayor y más rápido son sociales, políticos y culturales.

La innovación tiene un papel inestimable que jugar ante tal incertidumbre. Ofrece un mecanismo para reducir el riesgo por el *statu quo* a través del aprendizaje sistemático. Además, proporciona un medio para movilizar la participación y un sentido de posibilidad a través de experiencias que identifican combinaciones de intervenciones relevantes junto con las narrativas de referencia necesarias para la transformación.¹²¹ Pero el paradigma de la innovación misma necesita cambiar para adoptar un enfoque estratégico y sistémico.¹²²

La innovación desplegada con el objetivo de la transformación socioeconómica parte de necesidades y contextos específicos y utiliza una cartera de estrategias variadas y complementarias para activar intervenciones en la economía real. En lugar de crear el embudo competitivo habitual, seleccionando de modo gradual soluciones ganadoras optimizadas para la inversión de capital, una cartera de innovaciones sistémicas selecciona y activa una variedad de posibilidades a la vez: todos se conectan para ofrecer una oportunidad de aprender dándoles sentido, o *sensemaking*. Aspirar a catalizar el cambio sistémico significa pensar en términos de puntos de intervención más o menos efectivos, impulsores de cambio, palancas o puntos de influencia móviles, para usar la terminología de Donella Meadows, la cual reconoce, en otras palabras, que los sistemas tienen propiedades dinámicas.¹²³

El sector energético es el responsable de aproximadamente dos tercios de las emisiones globales de CO₂, y los avances tecnológicos por sí solos no resolverán la crisis climática: las dos décadas de políticas de innovación centradas en la tecnología deben ser seguidas por un paradigma de innovación diferente. El apoyo a la innovación también debe ir de la mano de innovaciones sociales, políticas, económicas, financieras e institucionales.

Esto es especialmente importante para animar y catalizar las actuaciones y el cambio de comportamiento de la sociedad civil, en lugar de intentar forzarlo. Uno de los mayores obstáculos para la transformación es un problema de creencia empírica: ver para creer. Los que toman decisiones necesitan opciones. La innovación puede generar opciones a través de la experiencia de la experimentación y demostración en lugares y contextos locales, con agentes de cambio comunes.

¿Qué cambio estructurales tenemos que impulsar? La hora de la economía ecológica.

Para una mitigación del cambio climático efectiva y oportuna, como la que necesitamos, debemos abordar con urgencia las ideas, estructuras y sistemas económicos dominantes a los que se adhieren las naciones industrializadas y, cada vez más, también las naciones en desarrollo: los valores sociales, los sistemas sociales y los imperativos del diseño que estas ideas económicas producen, junto con algunos de los principios básicos de la civilización humana que crean normas en torno a la noción del dominio humano y de la explotación de los recursos naturales. En particular, necesitamos hacer un cambio definitivo más allá de las ideas económicas neoclásicas tradicionales y la economía neoliberal contemporánea que son las causas fundamentales del cambio

121 Véase Kay, John and King, Mervyn, *Radical Uncertainty: decision making for an unknowable future*, Londres 2020.

122 Véase la obra de Chôra Foundation (<https://www.chora.foundation/>) y EIT Climate-KIC (www.climate-kic.org).

123 Meadows, Donella H., *Thinking in Systems: A Primer*, Vermont, 2008.

climático antropogénico y de la parálisis de la humanidad para actuar de forma que se logre un cambio estructural. Ambos hacen virtudes del consumismo y el materialismo económico (la noción que las personas vivimos con los bienes y servicios como la base del bienestar y la prosperidad individual), junto con la creencia en el valor social del interés propio, de la maximización de las ganancias y la acumulación de capital en el mínimo tiempo posible y, sobre todo, la explotación de los recursos naturales y sociales sin ninguna necesidad de compensar el coste ecológico o social.

El neoliberalismo se ha vuelto tan generalizado que aceptamos sus proposiciones como si fueran una fuerza neutral, una especie de ley biológica como la teoría de la evolución de Darwin¹²⁴. Como consecuencia, la competencia se ha convertido en la característica que define a las relaciones humanas y a los ciudadanos, que somos simples consumidores cuyas elecciones democráticas se ejercen mejor en nuestras opciones de compra y venta, recompensando así el mérito y castigando la ineficiencia. Esto perpetúa el impulso de producir más de lo que podemos consumir, programar la obsolescencia en el diseño y la producción, y desperdiciar materiales y recursos a una escala sin precedentes a pesar de saber que hemos alcanzado límites planetarios en casi todos los recursos necesarios para mantener la vida. Como comenta el Dr. Jorge Majfud: “Intentar reducir la contaminación ambiental sin reducir el consumo es como combatir el narcotráfico sin reducir la adicción a las drogas”.¹²⁵

Estas ideas están profundamente arraigadas y, lo que es peor, están ancladas en una amplia gama de poderosos intereses, además de ser normalizadas como parte de los sistemas sociales y políticos a escala global y como características de la conveniencia, el hábito, las prácticas y las respuestas individuales a las normas sociales: el cómo actuar y el quién

Necesitamos hacer un cambio definitivo más allá de las ideas económicas neoclásicas tradicionales y la economía neoliberal contemporánea, que son las causas fundamentales del cambio climático antropogénico y de la parálisis de la humanidad, para lograr un cambio estructural. Ambos hacen virtudes del consumismo y el materialismo económico.

ser. Nos obstaculiza aún más el hecho de que hemos centralizado o descentralizado la toma de decisiones que controlan nuestros procesos. La gran división que rige nuestras políticas tiene que ver con si uno u otro gobierna sobre nuestro progreso, lo que nos impide ver la brecha que existe entre proteger o habilitar el estado de bienestar por un lado y proporcionar un mandato para actuar al estado empresarial por el otro¹²⁶. Es hora de aplicarnos para institucionalizar la esperanza y el cuidado en nuestros sistemas, como componentes de la naturaleza humana que son igual de poderosos que el miedo y la codicia que llevamos mucho tiempo alimentando. El bienestar humano depende del empoderamiento: nuestra capacidad de elegir y dar forma a nuestro destino y a nuestros medios, y del cuidado de los demás como parte de un contexto socialmente conectado. El éxito de la política social y económica debe medirse en más que el PIB y la productividad material. Necesitamos volver a redactar el derecho empresarial de sociedades para que no midamos el éxito de las empresas por el valor de sus acciones, sino por su contribución social y ecológica¹²⁷. La creación de este nuevo paradigma requiere un cambio sistémico a través de la reforma de nuestras instituciones, nuestras normas y nuestros valores. La clave de esta transición es una educación basada en el entendimiento ecológico tanto en el campo del diseño como en el de la economía, para facilitar

124 Monbiot, George, “Neoliberalism – the ideology at the root of all our problems”, *The Guardian*, viernes, 15 de abril de 2016.

125 Majfud, Jorge, “The Pandemic of Consumerism”. UN Chronicle, 2009. Archivado el 19 de Julio de 2013.

126 Mazzucato, Mariana, *The Entrepreneurial State: Debunking Private vs Public Sector Myths*, Nueva York, 2015.

127 Véase B-Corporation como ejemplo de los intentos de llevar el derecho corporativo en esta dirección en varias jurisdicciones: <https://bcorporation.net/>

transiciones sostenibles y hacer que otro mundo sea no solo posible sino deseable.¹²⁸

Para lograr esto, necesitamos una forma de evolución cultural gestionada de la sociedad humana hacia formas de gobernanza y comunidad mejor adaptadas al medio ambiente y al mundo como ecosistema. Los humanos somos una especie altamente cooperativa, principalmente a pequeña escala. No hemos evolucionado para funcionar como individuos. Nuestra arquitectura biológica nos hace aptos para vivir de una manera cooperativa en pequeños grupos sociales. Necesitamos reconstruir pequeños grupos de todo tipo para que los seres humanos podamos estar en un contacto mucho más estrecho con nuestros propósitos y trabajar más eficazmente a través de la colaboración y la generación de confianza traspasando las diferentes fronteras, inspirándonos, por ejemplo, en el trabajo de Elinor Ostrom sobre la gobernanza policéntrica.¹²⁹

¿Cómo nos identificamos con el entorno natural? Hacia un nuevo manifiesto para la identidad humana.

Finalmente, la problemática central y más fundamental de la acción climática es la percepción que tenemos los seres humanos de nosotros mismos y de nuestra identidad en relación con el entorno natural. La palabra “ciudadano” se deriva de la noción de civilización (humana) que a su vez conlleva el momento decisivo de asentarnos dentro de los muros y con las leyes de una ciudad (civis) con el objetivo de maximizar la autoconservación y la prosperidad a través de la organización de las relaciones y, sobre todo, el cultivo y la gestión de recursos por medio de nociones de propiedad o derechos sobre la tierra¹³⁰. El surgimiento de sociedades agrarias y, en última instancia, urbanas asociadas con la civilización en todo el planeta lleva incorporada una meta-narrativa sobre la identidad humana, justificada por una

inteligencia superior o un mandato divino, como el ser con el derecho de dominar la naturaleza, hacer uso de los recursos naturales y aprovechar las vidas y capacidades de otras especies para apoyar la vida humana y la expansión de las ambiciones humanas. Esa narrativa de referencia prácticamente ignora la incómoda verdad de la interdependencia con el mundo natural, que es tan importante para las comunidades originarias. Incluso más que nuestro apego al consumismo, el antropocentrismo es la última causa fundamental que requiere un cambio sistémico.

Necesitamos una forma de evolución cultural gestionada de la sociedad humana hacia formas de gobernanza y comunidad mejor adaptadas al medio ambiente y al mundo como ecosistema. Los humanos somos una especie altamente cooperativa, principalmente a pequeña escala. No hemos evolucionado para funcionar como individuos.

Para abordar esto, necesitamos reclamar el concepto y el propósito de la “innovación” como un verbo transitivo: no el acto intransitivo de crear cosas nuevas por sí mismo, sino el imperativo transitivo de una “innovación” del yo, un cambio de identidad y del concepto de sí mismo para permitir la coherencia con un contexto futuro emergente que exige modificaciones profundas. Cambiar las creencias humanas y las nociones de identidad a escala global, en diferentes culturas y sociedades, especialmente bajo la presión del tiempo, es una tarea inmensamente compleja para la cual no tenemos soluciones ya preparadas. Los cambios que son necesarios no están claramente definidos, y los límites de nuestra imaginación son demasiado claros, por lo tanto, debemos utilizar la innovación para explorar radicalmente enfoques inexplorados y tratar de catalizar una polinización cruzada inesperada al unir diferentes disciplinas y comunidades.

128 Boehnert, <https://theconversation.com/surviving-climate-change-means-transforming-both-economics-and-design-109164>

129 Ostrom, Elinor, *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge, RU, 1990.

130 Cicero, *De Oratore*, I, viii, 33-34.

Necesitamos identificar supuestos, valores, prácticas, estándares y comportamientos totalmente nuevos y diferentes en todos los campos industriales, sociales y económicos para permitir la escala y el ritmo de transformación que requerimos. Necesitamos múltiples actos de imaginación y para eso debemos unir de nuevo las artes y las ciencias: para intuir, representar y narrar nuestro camino hacia adelante tanto como lo calculamos y construimos. Como lo explica Brian Reich¹³¹:

“Nos hemos vuelto cómodos con la idea que el movimiento constante y el cambio incremental es una señal de impacto y progreso y que eso es suficiente. Casi hemos renunciado a la idea de resolver los problemas más complejos. No estamos usando nuestra imaginación. Hay una brecha entre las cosas en que pensamos, el tipo de impacto que intentamos producir y lo que quizás podríamos lograr.”

Cuando se trata de sistemas humanos, sobre todo, debemos reconocer que están formados por, y en última instancia representan, narrativas de identidad: los sistemas humanos crean significado y están estructurados por él. Estas narrativas son la función de los diálogos sociales a lo largo del tiempo. Su coherencia con los contextos que necesitamos abordar es la fuente de nuestra capacidad de perdurar y de cambiar. Necesitamos proporcionar a esas narrativas una riqueza de elementos nuevos, con un suministro constante de diferencias, con imágenes de la posibilidad de formas alternativas de vivir y de

Crear una mayor capacidad de resistir y superar como factor del diseño planificado, no simplemente como consecuencia de un desastre, debe formar la esencia de nuestra respuesta al cambio climático.

ser, para que podamos crear las nuevas formas en que nuestros sistemas y nosotros mismos podemos ser transformados.

Crear una mayor capacidad de resistir y superar como factor del diseño planificado, no simplemente como consecuencia de un desastre, debe formar la esencia de nuestra respuesta al cambio climático. En 2020, en medio de una emergencia sanitaria mundial y una crisis económica inminente, una inversión concertada en la transformación impulsada por la innovación que trabaje en la línea de un modelo integrado de “personas, planeta y prosperidad”¹³² quizás nos permitiría salir al otro lado con una capacidad de renovación continua a través del aprendizaje dinámico. Necesitamos replantear nuestras intenciones y acciones constantemente, viviendo en un estado permanente de aprendizaje, descubrimiento y reforma. Nuestros esfuerzos de innovación nos ayudarán si están diseñados para explorar las posibilidades que las cosas ofrezcan, descubrir la forma de lograr algo diferente, e idear y comprometernos con una nueva imagen de nosotros mismos que será consistentemente coherente con un clima cambiado y un contexto cambiante.

131 Reich, Brian, *The Imagination Gap: Stop Thinking the Way You Should and Start Making Extraordinary Things Happen*, Bingley 2018, p. xi. Véase también: Nowotny, Helga: *Insatiable Curiosity: Innovation in a Fragile Future*, Londres, 2010.

132 Véase El Club de Roma, <https://clubofrome.org/publication/the-planetary-emergency-plan/> y <https://clubofrome.org/impact-hubs/climate-emergency/emerging-from-the-emergency-key-policy-recommendations-to-g20-leaders/>





Howard J. Herzog

Director Ejecutivo del centro de energía baja en carbono de captura, utilización y almacenamiento de carbono del MITel, *Senior Research Engineer* en la *Energy Initiative*. Estudió su licenciatura y doctorado en ingeniería química en el MIT. Tiene experiencia industrial con Eastman Kodak (1972-1974), Stone & Webster (1975-1978), Aspen Technology (1981-1986) y Spectra Physics (1986-1988). Desde 1989, ha formado parte del personal de investigación del MIT, donde trabaja en investigaciones patrocinadas que están relacionadas con la energía y el medio ambiente, con énfasis en tecnologías de mitigación de gases de efecto invernadero. Autor principal coordinador del Informe Especial del IPCC sobre captura y almacenamiento de dióxido de carbono (2005), coautor del estudio del MIT *Future of Coal Study* (2007) y delegado de los EEUU en el Carbon Sequestration Leadership Forum's Technical Group (2003- 2007). Fue galardonado con el Premio Greenman 2010 por el IEAGHG como “reconocimiento a las contribuciones realizadas al desarrollo de tecnologías de control de gases de efecto invernadero”. En 2018, fue autor de del libro *Carbon Capture para MIT Press Essential Knowledge Series*.



Rubén Juanes

Ingeniero de Caminos, Universidade da Coruña, España (1997); *Master of Science*, UC Berkeley, USA (1999); y PhD, UC Berkeley, USA (2003). Ingeniero y geocientífico computacional, con un gran interés en la física del flujo multifásico en medios porosos. Sus investigaciones se centran en el avance de nuestra comprensión fundamental y capacidades predictivas sobre el flujo simultáneo de dos o más fluidos a través de rocas, suelos y otros materiales porosos. La investigación en su grupo combina teoría y simulación con experimentos que iluminan aspectos fundamentales del flujo de múltiples fluidos, que luego se aplica para la predicción de problemas en las ciencias de la tierra a gran escala en los campos de energía y el medio ambiente, incluido el almacenamiento geológico de carbono, hidratos de metano, y la ecohidrología de ambientes áridos. Premio del Departamento de Energía por Contribuciones Destacadas en Geociencias (2012), y Premio al Científico Joven del Departamento de Energía (2010). Ponente plenario de la *Gordon Research Conference* sobre Hidratos de Gas Natural (2010), profesor ARCO en Estudios de la Energía (2008) y profesor Gilbert W. Winslow en Desarrollo Profesional (2007).

2.6 ¿Es necesario capturar y almacenar el CO₂?

¿Qué hacer con el CO₂, una vez capturado?

¿Qué tecnologías de captura de CO₂ existen actualmente?

¿En qué consiste el almacenamiento geológico?

¿Cuáles son las perspectivas de futuro?

¿Qué hacer con el CO₂, una vez capturado?

La captura y almacenamiento de dióxido de carbono (conocido generalmente por sus siglas en inglés: CCS, *carbon capture and storage*) consiste primero en la captura de CO₂ generado al quemar combustibles fósiles antes de que este se libere en la atmósfera. Recientemente, también se ha generado un interés considerable en el uso de las tecnologías de CCS para eliminar CO₂ directamente de la atmósfera. Esta situación necesariamente suscita la cuestión de qué hacer con el CO₂ una vez capturado, tanto si este procede directamente de la atmósfera como si se recupera de la corriente de gases de combustión de una central eléctrica.

Si bien existen algunas posibilidades de usarlo como materia prima, actualmente resultan ser muy limitadas, tanto en la cantidad como en la velocidad a la que se pueden implementar de forma económica. Así que la mayoría de las estrategias que se consideran ahora para la CCS requieren la inyección de CO₂ como fluido supercrítico en formaciones geológicas a gran profundidad, donde se puede almacenar durante muchos años. En el caso de la quema de combustibles fósiles, esta práctica se

puede considerar como un circuito cerrado: se extrae el carbono de la tierra en forma de combustibles fósiles y luego se lo devuelve en forma de CO₂. En el caso de la captura de CO₂ desde la atmósfera, genera lo que se considera “emisiones negativas”¹³³.

Un aspecto que resulta absolutamente crucial en cualquier consideración de las tecnologías empleadas para mitigar el cambio climático es la escala del problema¹³⁴. Actualmente, las emisiones antropogénicas de CO₂ son del orden de 40 gigatoneladas por año (40 GtCO₂/año). Si consideramos una densidad típica de CO₂ supercrítico en un depósito subterráneo de 500 kg/m³, entonces las emisiones actuales corresponden a una tasa volumétrica de aproximadamente 1.400 millones de barriles de CO₂ supercrítico comprimido por día: aproximadamente 20 veces mayor que el volumen de petróleo que se consume diariamente en todo el mundo. Incluso si la CCS mitigara solo una fracción de las emisiones actuales (por ejemplo, del 5 al 10 % del total), todavía tendría que operar a una escala de gigatoneladas por año, y eso supone definitivamente un desafío desmesurado que comparten todas las tecnologías para la mitigación del cambio climático.

133 Herzog, H.J. (2018) *Carbon Capture*, an MIT Press Essential Knowledge Series Book <https://mitpress.mit.edu/books/carbon-capture>

134 Pacala S., Socolow R. (2004) Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 305, 968–972.

International Energy Agency (2020) *Energy Technologies Perspectives 2020 (ETP2020) – Special Report on Clean Energy Innovation*. <https://www.iea.org/reports/clean-energy-innovation>

¿Qué tecnologías de captura de CO₂ existen actualmente?

Actualmente, el lavado químico es el proceso que más se usa para capturar CO₂. El proceso consta de dos pasos principales: primero, la absorción, y después, la desorción y el arrastre. En el primero de estos pasos, se captura el CO₂ que forma parte del gas de escape de una central eléctrica o de un proceso industrial a través de una reacción química con un solvente líquido. En el segundo paso, conocido como *stripping* y que ocurre a temperaturas elevadas, se separa o libera el CO₂ del disolvente, de modo que este último se puede enfriar y usar posteriormente en un nuevo proceso de absorción de más CO₂. Las aminas son el solvente más comúnmente usado hoy en día. Este tipo de procedimiento se conoce como una solución “Goldilocks”: los enlaces químicos que el solvente forma con el CO₂ no deben ser ni demasiado fuertes ni demasiado débiles. La atracción tiene que ser lo suficientemente fuerte para capturar el CO₂ de los gases de escape, pero también debe ser lo suficientemente débil para que la reacción pueda revertirse fácilmente a temperaturas elevadas.

La captura de CO₂ desde los gases de escape supone gastos en términos monetarios y energéticos. Por esa razón hay investigaciones que buscan mejores procesos de captura. Los enfoques adoptados incluyen la separación de CO₂ del gas de escape mediante adsorbentes sólidos, membranas o la criogenia (es decir, la congelación del CO₂). Otro método en estudio –la “oxicombustión”– consiste en quemar el combustible fósil en oxígeno de alta pureza en lugar de hacerlo en aire. Así, el gas de escape resultante consiste en una alta concentración de CO₂ junto con vapor de agua, y este se puede separar fácilmente mediante condensación. Treinta años atrás, las centrales eléctricas que quemaban carbón eran uno de los escenarios principales en los que se planteaba la CCS. Sin embargo, los sistemas energéticos han cambiado sustancialmente desde entonces. Hoy en día, la CCS se considera para centrales que queman gas natural o biomasa, pero también para plantas industriales como las que producen cemento o acero, para los procesos de producción de hidrógeno e incluso, como

hemos mencionado, para la captura de CO₂ del aire. Cada una de estas fuentes contiene una concentración de CO₂ diferente: casi 100 % (CO₂ puro) en los gases de escape de la producción de amoníaco o etanol, alrededor del 60 % en los que resultan de la producción de hidrógeno, aproximadamente el 20 % en los de las plantas de cemento, el 12-15 % de las calderas de carbón, el 3-5 % de turbinas de gas natural, y el 0,04 % en el aire. En general, cuanto menor es la concentración, más difícil y costoso resulta el proceso de captura. Si bien la mayoría de estas fuentes consisten en gas a presión atmosférica, en algunos casos se trata de una corriente de gas a alta presión, por ejemplo, el que sale de un proceso de gasificación, y eso hace que la captura de CO₂ sea más fácil y menos cara. Una última cosa a tener en cuenta es la concentración de impurezas en la corriente de gas: en términos generales, cuantas más impurezas haya presentes, más costosa resultará la captura del dióxido de carbón.

La captura de CO₂ desde los gases de escape supone gastos en términos monetarios y energéticos. Por esa razón hay investigaciones que buscan mejores procesos de captura.

Últimamente ha habido mucho interés en retirar CO₂ de la atmósfera. En este sentido, dos de las opciones que se están barajando requieren del uso de las tecnologías de la CCS. La primera opción es la bioenergía junto con la CCS, o BECCS, en la cual la biomasa en forma de madera o hierba absorbe el CO₂ del aire a través de la fotosíntesis. Luego, se cosecha la biomasa, se utiliza de combustible en una central eléctrica, y se captura el CO₂ para su posterior almacenamiento en formaciones geológicas. Este proceso da lugar a “emisiones negativas” porque captura CO₂ de la atmósfera y lo almacena de forma segura en formaciones geológicas. La segunda opción se llama captura directa del aire (conocida por sus siglas en inglés: DAC, direct air capture) y consiste en eliminar el CO₂ del aire mediante procesos de lavado químico. Debido a la muy baja concentración de CO₂ en el aire, que está aproximadamente 300

veces más diluido que en los gases de escape de las centrales eléctricas o plantas industriales, la DAC resulta una opción muy cara hoy en día.

Una vez que se ha capturado el CO₂, es necesario trasladarlo al sitio de almacenamiento, lo cual se realiza habitualmente por tubería. Esto requiere que se comprima el CO₂ capturado a presiones de entre 100 y 150 bar, bajo las cuales adquiere características de un líquido. El transporte por tubería resulta muy económico a grandes escalas, y por eso resulta ventajoso operar con tuberías que tengan la capacidad de mover por lo menos diez millones de toneladas por año. Dado que esto es mucho más CO₂ del que la gran mayoría de fuentes produce individualmente, se prevé la creación de nodos de transporte donde se combine CO₂ procedente de múltiples fuentes. El transporte por barco también es posible, pero suele ser más caro que el uso de tuberías. El CO₂ viaja por barco como un líquido criogénico presurizado (por ejemplo, a 20 bar y -20 °C), similar al transporte actual de GLP (gas licuado de petróleo). En la actualidad, se están desarrollando activamente esquemas de transporte por barco para la región del Mar del Norte en Europa y también en Japón.

¿En qué consiste el almacenamiento geológico?

El almacenamiento de CO₂ comprimido en el subsuelo se realiza mediante pozos de inyección a una profundidad de entre 1 y 3 km, donde el CO₂ se encuentra en forma supercrítica (con la densidad de un líquido, pero con la viscosidad de un gas). En principio, diferentes entornos geológicos pueden almacenar el CO₂ durante milenios. Una opción es inyectar el CO₂ en yacimientos de los cuales ya hemos extraído petróleo o gas. Las ventajas de esta opción incluyen que tales estructuras geológicas han sido caracterizadas en detalle, y que el CO₂ puede ser utilizado para extraer petróleo que no se podría sacar sin emplear una técnica similar (EOR, enhanced oil recovery), así compensando parte del coste asociado con la CCS (con el petróleo o gas se produciría

Dado que casi siempre es más barato emitir CO₂ a la atmósfera que capturarlo y almacenarlo, se requieren políticas que creen mercados para la CCS. Algunas de estas políticas pueden ser generales, como un impuesto al carbono que se aplique a toda la economía. Otros se pueden enfocar específicamente en la CCS, como los beneficios fiscales.

una fracción del CO₂ necesario, que sería separado y reinyectado al depósito). Aunque esta opción resulta atractiva, y además la industria tiene décadas de experiencia con el EOR por CO₂, los depósitos de petróleo y gas que hemos usado siempre tendrán una capacidad limitada y su disponibilidad geográfica no es siempre conveniente. Otra opción para el almacenamiento de CO₂ es la inyección en acuíferos salinos profundos. Estos son estratos geológicos permeables, a más de 1 km de profundidad, que contienen agua en sus poros

Parece probable que la captura y almacenamiento de carbono permita una mitigación viable del cambio climático en relación con una capacidad de almacenamiento a escala de gigatoneladas y que, además, constituya una solución extendida territorialmente.

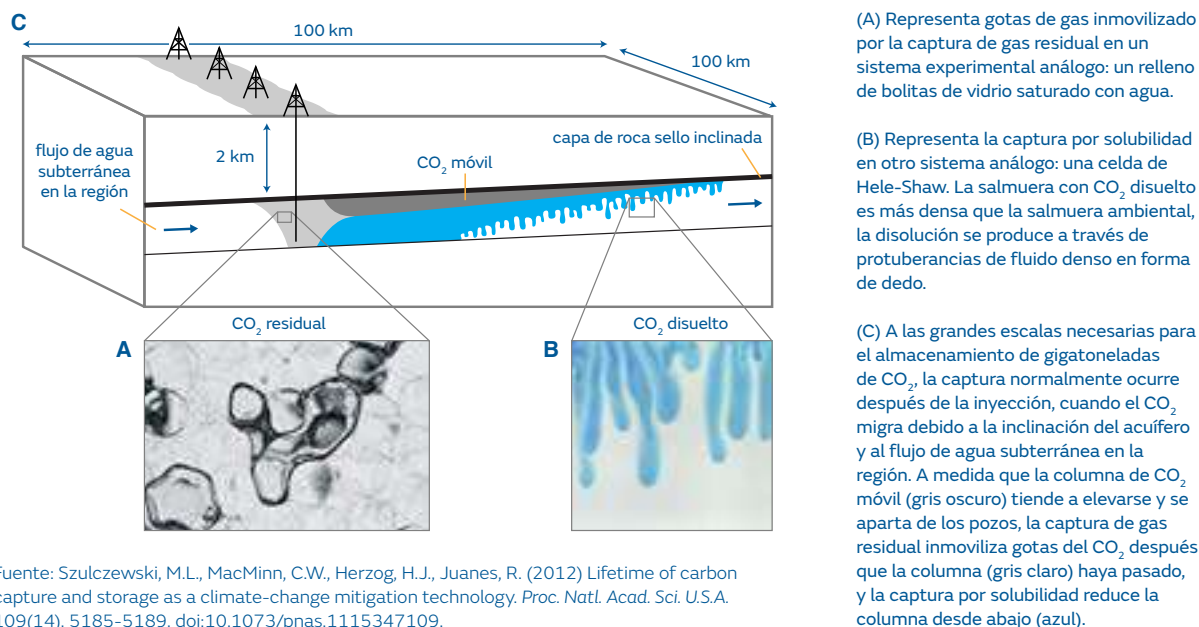
con una salinidad mucho más alta que la del agua de mar. Por lo general, están confinados entre capas de una roca de cobertura de muy baja permeabilidad, o “roca sello”. Los acuíferos salinos profundos constituyen la opción más prometedora para el almacenamiento de CO₂ a gran escala, ya que están muy extendidos por el planeta y ofrecen una capacidad de almacenamiento potencialmente enorme¹³⁵.

A día de hoy, los mecanismos físicos que entran en acción durante la inyección y el almacenamiento de CO₂ se conocen bastante bien. La inyección de CO₂ supercrítico suele crear una columna de líquido menos denso que tiende

135 IPCC (2005) Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, eds. Metz B., et al.

(Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido). <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/>

Figura 17 • La captura de gas residual y la captura por solubilidad son los dos mecanismos clave que contribuyen a la capacidad de almacenamiento de CO₂.



Fuente: Szulczewski, M.L., MacMinn, C.W., Herzog, H.J., Juanes, R. (2012) Lifetime of carbon capture and storage as a climate-change mitigation technology. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 109(14), 5185-5189, doi:10.1073/pnas.1115347109.

a subir y luego a migrar lateralmente dentro de la capa del depósito confinado por la roca sello. De esta forma, es la misma estructura geológica la que inicialmente evita la fuga del CO₂. Con el tiempo, otros mecanismos tal como la captura de gas residual y la captura por solubilidad contribuyen al almacenamiento de CO₂ a largo plazo (ver Figura 17). Es crucial tener en cuenta dos restricciones físicas a la hora de estimar la capacidad de almacenamiento de una formación geológica¹³⁶. Primero, la migración de CO₂ debe limitarse para asegurar que el CO₂ móvil quede totalmente atrapado y no pueda llegar a vías de fuga como afloramientos, grandes fallas o zonas de alta permeabilidad en la capa de roca sello. Segundo, hay que asegurarse que el incremento de la presión del fluido en los poros de la capa del depósito como resultado de la inyección de CO₂ no comprometa la integridad de la capa de roca sello.

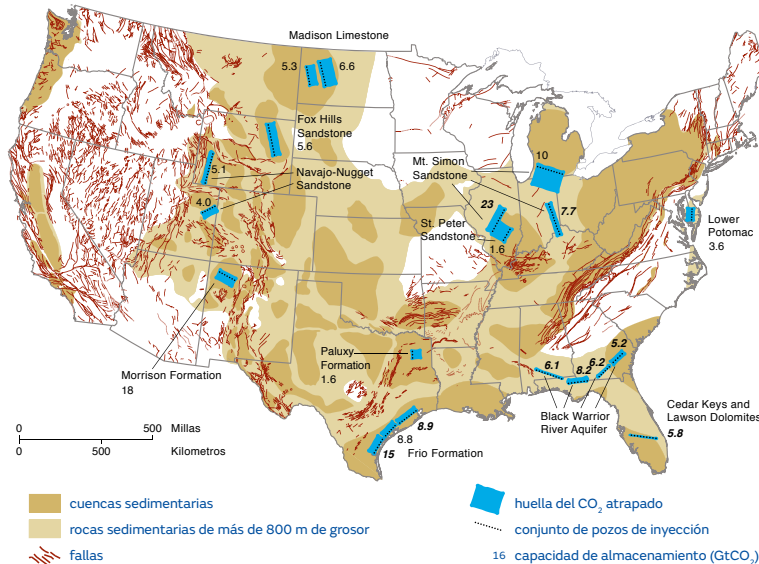
De hecho, la presurización de la formación es un factor importante. Se sabe que la inyección de fluidos modifica los diferentes stresses que afectan a las fallas geológicas y también que es responsable de inducir temblores en diferentes aplicaciones tecnológicas relacionadas con la energía subterránea¹³⁷. Es evidente entonces que la preocupación por el riesgo de sismicidad y las posibles fugas de CO₂ a través de fallas es perfectamente legítima¹³⁸. Sin embargo, la relevancia de estas consideraciones para la CCS debe entenderse en el contexto adecuado: depósitos geológicos de fluidos con una tendencia de flotar (hidrocarburos, pero también dióxido de carbono y otros gases) han existido durante millones de años en áreas de intensa actividad sísmica. De particular importancia es la selección adecuada de sitios con geologías dominadas por rocas sedimentarias “blandas” que no son propensas a un comportamiento sísmico y en las cuales no se establecen vías de

136 Szulczewski, M.L., MacMinn, C.W., Herzog, H.J., Juanes, R. (2012) Lifetime of carbon capture and storage as a climate-change mitigation technology. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 109(14), 5185-5189, doi:10.1073/pnas.1115347109.

137 National Research Council (2012) *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies* (National Academy Press, Washington, DC).

138 Zoback M.D., Gorelick S.M. (2012) Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 109(26), 10164–10168.

Figura 18 • Estimación de la capacidad de almacenamiento de los Estados Unidos, a nivel nacional, a partir de 20 conjuntos de pozos de inyección en 11 acuíferos.



Estos acuíferos se han seleccionado porque son grandes, exhiben pocas fallas a escala de toda la cuenca y se han caracterizado bastante bien. El mapa muestra las ubicaciones de los acuíferos y sus capacidades de almacenamiento para un período de inyección de 100 años. Las capacidades indicadas en negrita y cursiva están limitadas por la presión, las otras cifras están limitadas por la migración. El mapa también muestra las huellas finales de CO₂ para esas capacidades, que se corresponden con las áreas infiltradas por la migración de CO₂ en fase libre antes de quedar completamente atrapado.

Fuente: Szulczewski, M.L., MacMin, C.W., Herzog, H.J., Juanes, R. (2012) Lifetime of carbon capture and storage as a climate-change mitigation technology. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 109(14), 5185-5189, doi:10.1073/pnas.1115347109.

fuga por fallas¹³⁹. Por lo tanto, parece probable que la CCS permita una mitigación viable del cambio climático en relación con una capacidad de almacenamiento a escala de gigatoneladas y que, además, constituya una solución extendida territorialmente. En este sentido, el estudio de Szulczewski et al. (2012) describe la existencia de acuíferos salinos profundos a lo largo de los Estados Unidos que podrían aguantar los aumentos de presión asociados con la inyección de CO₂ a gran escala y la migración de CO₂ durante un periodo del orden de siglos (ver Figura 18).

¿Cuáles son las perspectivas de futuro?

Actualmente, proyectos de la CCS almacenan con éxito más de 30 millones de toneladas de CO₂ cada año. Dos de ellos operan en centrales eléctricas que queman carbón: Boundary Dam en Saskatchewan, Canadá, y Petra Nova, cerca de Houston, Texas. Sin embargo, en mayo de 2020, las operaciones de CCS se suspendieron en la planta de Petra Nova debido a que los bajos

precios del petróleo afectaron negativamente la economía de las operaciones de EOR.

Los otros proyectos de captura operan en diferentes sectores industriales que incluyen el procesamiento de gas natural y la producción de fertilizantes, hidrógeno, etanol o acero. La mayoría de estos proyectos almacenan el CO₂ como parte de las operaciones del EOR, pero algunos usan formaciones salinas profundas.

El uso de la CCS para generar las denominadas emisiones negativas está en mantillas. La planta DRAX en el Reino Unido es la central eléctrica de combustión de biomasa más grande del mundo (2,6 GW). Recientemente han puesto en marcha una planta piloto de la BECCS con una capacidad de una tonelada por día. Mientras tanto, la empresa suiza Climeworks vende unidades operativas de la DAC que capturan miles de toneladas de CO₂ por año. Otras compañías que producen tecnologías para la DAC incluyen Carbon Engineering y Global Thermostat.

Es muy difícil establecer los costes precisos de la CCS, porque es una tecnología emergente

¹³⁹ Juanes, R., Hager, B.H., Herzog, H.J. (2012) No geologic evidence that seismicity causes fault leakage that would render large-scale carbon capture and storage unsuccessful. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 109(52), E3623, doi:10.1073/pnas.1215026109.

y las cadenas de suministro aún no están del todo desarrolladas. Eso hace que el precio de las primeras unidades y de los primeros casos hoy en día sea más alto que el precio que se puede esperar pagar cuando la operación sea a gran escala en el futuro. Además, existen variaciones geográficas significativas en las inversiones necesarias, en el precio de la energía y en los requisitos reglamentarios. Las estimaciones actuales del coste por tonelada métrica de CO₂ cuando la producción sea a gran escala son inferiores a los 50 dólares estadounidenses para fuentes a altas presiones, como el procesamiento de gas natural, o para fuentes de alta pureza, como la producción de etanol o amoníaco. Este importe se sitúa entre los 50 y los 100 dólares por tonelada de CO₂ para la mayoría de las centrales eléctricas o procesos industriales, y se eleva a 200-250 \$/tCO₂ para la BECCS. A pesar de algunas estimaciones muy bajas para el coste de la DAC (100-200 \$/tCO₂), parece ser que un rango más realista es 500-1.000 \$/tCO₂. Hay que tener en cuenta que estos costes se basan en la cantidad neta de

CO₂ capturado, es decir, la cantidad capturada en origen menos las emisiones atribuidas a los procesos de la CCS.

Dado que casi siempre es más barato emitir CO₂ a la atmósfera que capturarlo y almacenarlo, se requieren políticas que creen mercados para la CCS¹⁴⁰. Algunas de estas políticas pueden ser generales, como un impuesto al carbono que se aplica a toda la economía. Otros se pueden enfocar específicamente en la CCS, como los beneficios fiscales 45Q en los Estados Unidos, que tienen un valor de unos 50 dólares por cada tonelada de CO₂ que se almacena en formaciones geológicas. Además, se necesitan políticas para regular la industria de la CCS, como la definición de requisitos para permiso de perforar pozos de inyección de CO₂ y de operar tuberías de CO₂. También se deben desarrollar políticas para monetizar las llamadas emisiones negativas. La forma en que se desarrollen estas políticas determinará el crecimiento futuro de la CCS.

140 National Petroleum Council (2019) *Meeting the Dual Challenge: A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use, and Storage*. <https://dualchallenge.npc.org/>



Glosario

Glosario

Glosario desarrollado a partir de información disponible en:

<https://meteoglosario.aemet.es>

<https://www.ipcc.ch>

<https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/consecuencias-efecto-invernadero>

<https://es.wikipedia.org>

<https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>

<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico>

<https://dle.rae.es>

Absorción. Operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un disolvente líquido con el cual forma solución.

Adaptación al cambio climático. Medidas orientadas a limitar los impactos, reducir las vulnerabilidades e incrementar la resiliencia frente al cambio del clima de los sistemas humanos y naturales, incluyendo la biodiversidad, los bosques, las costas, las ciudades, el sector agrario, la industria, etc.

Aerosol. Suspensión de partículas diminutas de sólidos o líquidos en el aire u otro gas.

Albedo terrestre. Fracción de radiación solar que es reflejada por la tierra, el mar, la nieve y el hielo.

Antigragilidad. Capacidad de un material, mecanismo o sistema para mejorar respecto a su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido.

Antropoceno. El Antropoceno (de griego anthropos, 'ser humano', y kainos, 'nuevo') es la época geológica propuesta por parte de la comunidad científica para suceder o reemplazar al denominado Holoceno, la época actual del período Cuaternario en la historia terrestre, debido al significativo impacto global que las actividades humanas han tenido sobre los ecosistemas terrestres. No hay un acuerdo común respecto a la fecha precisa de su comienzo; algunos lo consideran junto con el

inicio de la Revolución Industrial (a finales del siglo XVIII), mientras que otros investigadores remontan su inicio al comienzo de la agricultura, solapando enteramente al Holoceno.

Antropogénico. Perteneciente o relativo a lo que procede de los seres humanos que, en particular, tiene efectos sobre la naturaleza.

Aproximación fragmentada. Forma de abordar un problema resolviéndolo por partes, sin tener en cuenta las interdependencias del sistema.

Biodiversidad. La definición más extendida la ofrece el Convenio sobre Diversidad Biológica de 1992. Biodiversidad es la variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otros, los ecosistemas terrestres y marinos y otros sistemas acuáticos, y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas. La biodiversidad abarca, por tanto, la enorme variedad de formas mediante las que se organiza la vida. Incluye todas y cada una de las especies que cohabitan con nosotros en el planeta, sean animales, plantas, virus o bacterias, los espacios o ecosistemas de los que forman parte y los genes que hacen a cada especie, y dentro de ellas a cada individuo, diferente del resto.

Cambio climático. cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural

del clima observada durante períodos de tiempo comparable.

Captura de CO₂. Separación del dióxido de carbono del resto de gases que se originan durante la combustión en una actividad industrial.

Carbono elemental (black carbon). Parte del aerosol atmosférico (material sólido o líquido en suspensión en la atmósfera) que está compuesto íntegramente por carbono, que típicamente procede de la combustión incompleta de combustibles fósiles y madera, a veces referido también como hollín. Esto le confiere un color negro que hace que, en contra de lo que sucede con el resto de aerosoles, sea un absorbedor neto de calor en la atmósfera. Precisar su forzamiento radiativo neto es muy complejo ya que se trata de una especie de vida corta (4-12 días) y por tanto su efecto varía mucho localmente. Aproximadamente se estima que su capacidad de calentamiento (por unidad de masa) es del orden de 460-1500 veces mayor que el del CO₂ (C&CAC). Además, tiene efectos negativos en la salud y acelera el deshielo cuando se deposita en glaciares o mantos de nieve.

Ciclo del carbono. Término que describe el flujo de carbono (en forma, por ejemplo, de dióxido de carbono -CO₂-) en la atmósfera, el océano, la biosfera terrestre y marina y la litosfera. La unidad de referencia para el ciclo del carbono global en los informes del IPCC es la Gt CO₂ o GtC (gigatonelada de carbono = 1 GtC = 1.015 gramos de carbono; equivale a 3,667 Gt CO₂).

Climáticamente neutral. Sistema donde las emisiones netas de gases de efecto invernadero son nulas, incluyendo la absorción en sumideros o la compensación con otras acciones, como comprando créditos.

CO₂ supercrítico. Dióxido de carbono que se encuentra en condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico (30,95 °C y 72,8 atm), lo que hace que se comporte como un híbrido entre un líquido y un gas, es decir, puede difundirse como un gas y disolver sustancias como un líquido. Por encima de las condiciones críticas, pequeños cambios

en la presión y la temperatura producen grandes cambios en la densidad.

Comercio de derechos de emisión. Instrumento de mercado, mediante el que se crea un incentivo o desincentivo económico que persigue un beneficio medioambiental: que un conjunto de plantas industriales reduzcan colectivamente las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

Compensación de carbono. Reducción en las emisiones de dióxido de carbono o gases de efecto invernadero hecha para compensar una emisión efectuada en otro lugar.

Conferencia de las Partes de la CMNUCC (COP, por sus siglas en inglés). Órgano supremo en el que se reúnen las Partes de la CMNUCC para adoptar decisiones. La COP se reúne una vez al año desde 1995 (un año después de la entrada en vigor de la CMNUCC, a excepción de 2020 por la pandemia Covid-19). Tiene el mandato de revisar la implementación de la Convención y puede negociar nuevos compromisos.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Órgano de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, adoptada en 1992, que entró en vigor en 1994, y que ha sido ratificada por 195 países (Partes de la Convención). La Convención reconoce la existencia del problema del cambio climático, y establece un objetivo último: lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera con el fin de impedir interferencias antropogénicas (causadas por el ser humano) peligrosas en el sistema climático. Además, indica que ese nivel debe lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

Costes de capital. Coste en el que incurre una empresa para financiar sus proyectos de inversión a través de los recursos financieros propios.

Depósito. Uno o más componentes del sistema climático en que está almacenado un gas de efecto invernadero o un precursor de un gas de efecto invernadero

Descarbonización. Eliminación de las emisiones de gases de efecto invernadero en un sistema, economía o producto.

Dinámica de sistemas. Metodología para analizar y modelar el comportamiento temporal en entornos complejos. Se basa en la identificación de los bucles de realimentación entre los elementos, y también en las demoras en la información y materiales dentro del sistema.

Ecosistema. Sistema biológico constituido por una comunidad de organismos vivos (biocenosis) y el medio físico donde se relacionan (biotopo). Los ecosistemas suelen formar una serie de cadenas que muestran la interdependencia de los organismos dentro del sistema. Se considera que los factores abióticos y bióticos están ligados por las cadenas tróficas o sea el flujo de energía y nutrientes en los ecosistemas.

Efecto invernadero. Fenómeno natural por el que determinados gases presentes en la atmósfera retienen parte de la radiación térmica emitida por la superficie terrestre tras ser calentada por el sol, manteniendo la temperatura del planeta a un nivel adecuado para el desarrollo de la vida.

Empoderamiento. Acción y efecto de dar a alguien autoridad, influencia o conocimiento para hacer algo.

Ensamble. Conjunto de simulaciones de modelos que caracterizan una predicción climática o una proyección climática. Las diferencias en las condiciones iniciales y la formulación de los modelos dan lugar a diferentes evoluciones de los sistemas de los modelos y pueden aportar información sobre la incertidumbre asociada con el error de los modelos y con el error en las condiciones iniciales en el caso de los pronósticos climáticos y sobre la incertidumbre asociada con el error de los modelos y con la variabilidad del clima generada internamente en el caso de las proyecciones climáticas.

Formación geológica. Unidad litoestratigráfica formal que define cuerpos de rocas caracterizados por unas propiedades litológicas comunes (composición y estructura) que las diferencian de las adyacentes.

Forzamiento radiativo. Capacidad de atrapar o perder calor, según el signo, que aporta cada uno de los cambios que hacemos en la superficie terrestre o en la atmósfera. Según el IPCC, es una medida de la influencia que tiene un factor para modificar el equilibrio de la energía entrante y saliente en el sistema atmosférico de la Tierra y representa un índice de la importancia del factor como mecanismo potencial del cambio climático. El forzamiento positivo tiende a calentar la superficie mientras el forzamiento negativo tiende a enfriarla. También se puede definir como la variación, expresada en W/m^2 , del flujo radiativo (la descendente menos la ascendente) en la tropopausa o en la parte superior de la atmósfera, debida a una variación del causante externo del cambio climático (por ejemplo, una variación de la concentración de dióxido de carbono o de la radiación solar). A veces los elementos impulsores internos se siguen considerando forzamientos incluso aunque se deban a su alteración en el clima, como por ejemplo, las modificaciones de los aerosoles o los gases de efecto invernadero en los paleoclimas. A los efectos de los informes del IPCC, el forzamiento radiativo se define específicamente como la variación respecto de 1750 (fecha de referencia considerada como “pre-industrial”) y, a menos que se indique lo contrario, denota un promedio global anual.

Fuente. Cualquier proceso o actividad que libera un gas de invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de invernadero en la atmósfera.

Gas de efecto invernadero. Componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y reemiten radiación infrarroja, produciendo el efecto invernadero.

Gases de efecto invernadero (GEI). Sustancias que retienen parte de la radiación saliente de la tierra, aumentando su temperatura. Los principales son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y gases fluorados (hidrofluorocarbonos,

perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre y el trifluoruro de nitrógeno, gases sintéticos que se emiten en diversos procesos industriales). Cada uno de estos gases puede permanecer en la atmósfera durante diferentes períodos de tiempo, desde unos pocos años hasta miles de años. Todos estos gases permanecen en la atmósfera el tiempo suficiente para mezclarse bien; eso significa que la cantidad que se mide en la atmósfera es aproximadamente igual en todo el mundo, independientemente de la fuente de las emisiones.

Gobernanza. Arte o manera de gobernar que se propone como objetivo el logro de un desarrollo económico, social e institucional duradero, promoviendo un sano equilibrio entre el Estado, la sociedad civil y el mercado de la economía. También, se refiere a la forma de interacción de las administraciones públicas con el mercado y las organizaciones privadas o de la denominada sociedad civil (empresas, patronales, sindicatos y otras), que no obedecen a una subordinación jerárquica, sino a una integración en red, en lo que se ha denominado “redes de interacción público-privado-civil” a lo largo del eje local/global.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Organización científica internacional para la evaluación del cambio climático. Fue creado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 1988 para ofrecer una visión científica del estado actual de los conocimientos sobre el cambio climático y sus posibles repercusiones medioambientales y socioeconómicas.

Holístico. Concepción basada en la integración total y global frente a un concepto o situación.

Impuesto sobre el carbono. Medida fiscal que grava a los combustibles fósiles en proporción a la cantidad de carbono que contienen, ya que esto determina la cantidad de emisiones de CO₂ derivadas de su combustión.

Incertidumbre. Estado de conocimiento incompleto que puede deberse a una falta de información o a un desacuerdo con respecto a lo que es conocido o incluso cognoscible.

Puede deberse a distintas circunstancias, desde la imprecisión en los datos hasta una definición ambigua de un concepto o término, o una proyección incierta del comportamiento humano. Por ello, la incertidumbre puede representarse mediante magnitudes cuantitativas (p. ej., una función de densidad de probabilidad), o mediante asertos cualitativos (que reflejen, por ejemplo, una apreciación de un equipo de expertos)

Innovación. cambio que introduce novedades, y que se refiere a modificar elementos ya existentes con el fin de mejorarlos, aunque también es posible en la implementación de elementos totalmente nuevos.

Inteligencia colectiva. forma de inteligencia que surge a partir de la colaboración individuos diversos, generalmente de una misma especie, en relación a un tema en particular.

Interdependencia. Dependencia recíproca.

Intervalo de confianza. Par de valores que limitan un rango de datos entre los cuales hay una cierta seguridad desde el punto de vista estadístico –dado por el nivel de confianza deseado; por ejemplo un 90 %- . Alternativamente puede expresarse a través de un $\pm$ respecto a la media o centro del intervalo de confianza. En cualquier caso, indica que según una distribución estadística dada, típicamente Normal, existe un 90 % -por ejemplo- de probabilidad de que el dato real esté contenido en el intervalo estimado. Cuanto más pequeño es el intervalo de confianza, más robusta es la estimación.

Límites planetarios. Los límites planetarios o fronteras planetarias (en inglés: planetary boundaries) son un marco conceptual que evalúa el estado de 9 procesos fundamentales para la estabilidad del sistema Tierra y sugiere una serie de umbrales para estos procesos que, en caso de ser superados, pueden poner en peligro la habitabilidad del planeta. Este concepto fue propuesto en 2009 por un grupo de 28 científicos internacionales liderados por Johan Rockström del Stockholm Resilience Centre (SRC) y Will Steffen, de la Australian National University. El objetivo de estos científicos era definir un “espacio de actuación

seguro para el desarrollo humano” que pudiera ser utilizado por los gobiernos de todos los niveles, las organizaciones internacionales, la sociedad civil, el sector privado y la comunidad científica.

Líquido criogénico. Gas que se mantiene en estado líquido a temperaturas por debajo de 222 K (-49 °C).

Longitud de onda. Distancia que recorre una perturbación periódica que se propaga por un medio en un ciclo. Es la inversa de la frecuencia. La longitud de onda se suele representar con la letra griega λ .

Manglar. Área biótica o bioma formada por árboles muy tolerantes a las sales existentes en la zona intermareal cercana a la desembocadura de cursos de agua dulce en latitudes tropicales y subtropicales. Así, entre las áreas con manglares se incluyen estuarios y zonas costeras. Tienen una gran diversidad biológica con alta productividad y en ellas se encuentran muchas especies, tanto de aves como de peces, crustáceos y moluscos.

Mitigación del cambio climático. Conjunto de medidas para minimizar el impacto destructivo y perturbador del calentamiento global.

Paleoclima. Clima existente en períodos anteriores al desarrollo de instrumentos de medición, que abarca el tiempo histórico y el geológico y con respecto al cual sólo se dispone de registros indirectos.

Paradigma. Teoría o conjunto de teorías cuyo núcleo central se acepta sin cuestionar y que suministra la base y modelo para resolver problemas y avanzar en el conocimiento. Ejemplo o modelo de algo.

Partes por billón (ppb). Unidad de medida de concentración que mide la cantidad de unidades de sustancia que hay por cada billón (americano, es decir, mil millones) de unidades del conjunto. En el caso de gases en la atmósfera se habla de ppb en volumen, por lo que se refiere a la cantidad de m^3 del gas que hay en 1.000 millones de m^3 de la atmósfera.

Partes por millón (ppm). Unidad de medida de concentración que mide la cantidad de unidades de sustancia que hay por cada millón de unidades del conjunto. En el caso de gases en la atmósfera se habla de ppm en volumen, por lo que se refiere a la cantidad de m^3 del gas que hay en un millón de m^3 de la atmósfera.

Partículas orgánicas secundarias. Parte del aerosol atmosférico (material sólido o líquido en suspensión en la atmósfera) que se forma en la atmósfera a partir de sustancias orgánicas, típicamente compuestos orgánicos volátiles (COVs) tanto de origen biogénico como antropogénico. Los procesos físico-químicos que rigen la evolución de esta fracción de las partículas son extremadamente complejos y nuestra comprensión y su representación en los modelos es aún imperfecta.

Permafrost. Capa de suelo permanentemente congelado -pero no permanentemente cubierto de hielo o nieve- de las regiones muy frías o periglaciares, como la tundra. Puede encontrarse en áreas circumpolares de Canadá, Alaska, Siberia, Tíbet, Noruega y en varias islas del océano Atlántico sur.

Permeabilidad. Cualidad de ser penetrado o traspasado por el agua u otro fluido.

Planta de biomasa. Instalación industrial que produce energía eléctrica a través de la combustión de cualquier tipo de biomasa.

Planta de carbón. Instalación industrial que produce energía eléctrica a través de la combustión de carbón.

Portafolio. Conjunto de proyectos, trabajos o iniciativas.

Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential, GWP). Es una medida que compara el impacto climático potencial de las emisiones de los diferentes GEI. El potencial de calentamiento global de una sustancia compara el forzamiento radiativo integrado durante un período de tiempo específico (por ejemplo, 100 años) con el impacto de la emisión de una unidad de masa de CO_2 . Así, el potencial de calentamiento del CO_2 es igual a 1 y el del resto

de GEI se compara con el CO₂ en el período de tiempo seleccionado.

Presupuesto de carbono global. Cantidad de carbono que puede emitir una economía o una parte de ella en un período de tiempo determinado, introduciendo para ello los mecanismos adecuados que aseguren el cumplimiento de los objetivos de reducción.

Principio de precaución. Concepto que respalda la adopción de medidas protectoras ante las sospechas fundadas de que ciertos productos o tecnologías crean un riesgo grave para la salud pública o el medio ambiente, pero sin que se cuente todavía con una prueba científica definitiva.

Punto de inflexión. Punto en una trayectoria en el que se produce una modificación del sentido de la curvatura.

Reservorio. Depósito.

Resiliencia. Capacidad de adaptación de un ser vivo frente a un agente perturbador o un estado o situación adversos. Capacidad de un material, mecanismo o sistema para recuperar su estado inicial cuando ha cesado la perturbación a la que había estado sometido.

Retroalimentación. Retorno de parte de la energía o de la información de salida de un circuito o un sistema a su entrada.

Sensibilidad (de los modelos). En el contexto de la evaluación de los modelos numéricos para estudiar el clima, la sensibilidad se refiere al cambio en la respuesta del modelo cuando se cambia alguna variable de entrada. Un análisis de sensibilidad consiste en cuantificar los

cambios en el resultado de la simulación para una variable concreta cuando se modifican en cierto grado los parámetros de configuración del modelo o los datos de entrada (uno a uno).

Sinergia. Del lat. cient. synergia ‘tarea coordinada’, y este del griego synergía ‘cooperación’. Acción de dos o más causas cuyo efecto es superior a la suma de los efectos individuales.

Sistema climático.

- Sistema complejo que consta de cinco componentes principales: atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera, y de las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y por efecto de forzamientos externos, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares, y de forzamientos antropógenos, como el cambio de composición de la atmósfera o el cambio de uso del suelo.
- Totalidad de la atmósfera, la hidrosfera, la biosfera y la geosfera, y sus interacciones.

Sistémico. Perteneciente o relativo a la totalidad de un sistema; general, por oposición a local.

Solución incremental. Solución a un problema a través de la adición de mejoras limitadas sin una modificación sustancial del sistema.

Sumidero. Cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe un gas de efecto invernadero, un aerosol o un precursor de un gas de efecto invernadero de la atmósfera.

Unidades de masa. t=1.000 kg; kt=1.000 t; Mt=1.000.000 t; Gt=1.000.000.000 t

FUENTES DEL GLOSARIO

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (último acceso: Julio de 2020).

Etheridge, D.M., et al. 2010. Law Dome Ice Core 2000-Year CO₂, CH₄, and N₂O Data. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series #2010-070. NOAA/NCDC Paleoclimatology Program, Boulder CO, USA.

IPCC, 2013. «Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections», [Van Oldenborgh, G. J.; Collins, M.; Arblaster, J.; Christensen, J. H.; Marotzke, J.; Power, S. B.; Rummukainen, M. and Zhou, T. (eds.)]. In: «Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», [Stocker, T. F.; Qin, D.; Plattner, G. K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V. and Midgley, P. M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2014. «Summary for policymakers». In: «Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», [Field, C.B.; Barros, V. R.; Dokken, D. J.; Mach, K. J.; Mastrandrea, M. D.; Bilir, T. E.; M. Chatterjee, K.; Ebi, L.; Estrada, Y. O.; Genova, R. C.; Girma, B.; Kissel, E. S.; Levy, A. N.; MacCracken, S.; Mastrandrea, P. R. and White, L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

IPCC 2018. Página Web con información variada sobre los informes del IPCC (<https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>). Último acceso: agosto 2020.

IPCC, 2020. Sexto informe de evaluación del IPCC. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> y https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/05/2020-AC6_en.pdf (último acceso: agosto 2020).

J. R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman & M. Stievenard. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. NATURE, VOL 399, 3 JUNE 1999.

Lüthi, Dieter; Le Floch, Martine; Bereiter, Bernhard; Blunier, Thomas; Barnola, Jean-Marc; Siegenthaler, Urs; Raynaud, Dominique; Jouzel, Jean; Fischer, Hubertus; Kawamura, Kenji; Stocker, Thomas F (2008): CO₂ record from the EPICA Dome C 1999 (EDC99) ice core (Antarctica) covering 650 to 800 kyr BP measured at the University of Bern, Switzerland. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.710901>.

Mayor, B. 2016. The Water-Energy-Food Nexus, «Trends, Trade-offs and Implications for Strategic Energies». Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.

NASA. «Global Climate Change: Vital Signs of the Planet». <https://climate.nasa.gov>. (último acceso: agosto de 2020).

NOAA Mauna Loa CO₂ record: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

Vostok ice core data: <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/vostok.html>

