

CAMBIO CLIMÁTICO EVIDENCIA Y CAUSAS

ACTUALIZACIÓN 2020

*Una visión general de la Royal Society y la
Academia Nacional de Ciencias de EE. UU.*

**EL
REAL
SOCIEDAD**

PREFACIO

EL CAMBIO CLIMÁTICO ES UNO DE LOS PROBLEMAS DEFINITORIOS DE NUESTRO TIEMPO.

Ahora es más cierto que nunca, basado en muchas líneas de evidencia, que los humanos están cambiando el clima de la Tierra. La atmósfera y los océanos se han calentado, lo que ha ido acompañado de un aumento del nivel del mar, una fuerte disminución del hielo marino del Ártico y otros cambios relacionados con el clima. Los impactos del cambio climático en las personas y la naturaleza son cada vez más evidentes. Las inundaciones, las olas de calor y los incendios forestales sin precedentes han costado miles de millones en daños. Los hábitats están experimentando cambios rápidos en respuesta a los cambios en las temperaturas y los patrones de precipitación.

La Royal Society y la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, con sus misiones similares de promover el uso de la ciencia para beneficiar a la sociedad e informar los debates políticos críticos, produjeron el original *Climate Change: Evidence and Causes* en 2014. Fue escrito y revisado por un equipo de científicos climáticos líderes en el Reino Unido y Estados Unidos. Esta nueva edición, elaborada por el mismo equipo de autores, ha sido actualizada con los datos climáticos y análisis científicos más recientes, todos los cuales refuerzan nuestra comprensión del cambio climático causado por el hombre.

La evidencia es clara. Sin embargo, debido a la naturaleza de la ciencia, no todos los detalles están totalmente resueltos o son ciertos. Tampoco se ha respondido a todas las preguntas pertinentes. En todo el mundo se siguen reuniendo pruebas científicas. Algunas cosas se han vuelto más claras y han surgido nuevas ideas. Por ejemplo, el período de calentamiento más lento durante la década de 2000 y principios de la de 2010 ha terminado con un salto dramático a temperaturas más cálidas entre 2014 y 2015. La extensión del hielo marino antártico, que ha ido en aumento, comenzó a disminuir en 2014, alcanzando un récord en 2017 que ha persistido. Estas y otras observaciones recientes se han entrelazado en las discusiones de las cuestiones abordadas en este folleto.

Los llamamientos a la acción son cada vez más fuertes. La Encuesta de Percepción de Riesgos Globales 2020 del Foro Económico Mundial clasificó el cambio climático y los problemas ambientales relacionados como los cinco principales riesgos globales que probablemente ocurrirán en los próximos diez años. Sin embargo, la comunidad internacional aún tiene mucho camino por recorrer para mostrar una mayor ambición en materia de mitigación, adaptación y otras formas de abordar el cambio climático.

La información científica es un componente vital para que la sociedad tome decisiones informadas sobre cómo reducir la magnitud del cambio climático y cómo adaptarse a sus impactos. Este folleto sirve como una respuesta autorizada sobre el estado actual de la ciencia del cambio climático.

Estamos agradecidos de que hace seis años, bajo el liderazgo del Dr. Ralph J. Cicerone, ex Presidente de la Academia Nacional de Ciencias, y Sir Paul Nurse, ex Presidente de la Royal Society, estas dos organizaciones se asociaron para producir una visión general de alto nivel de la ciencia del cambio climático. Como actual presidente de estas organizaciones, nos complace ofrecer una actualización de esta referencia clave, respaldada por la generosidad de la Familia Cicerone.

Marcia McNutt

*Presidente de la Academia Nacional de Ciencias
Society*

Venki Ramakrishnan

*Presidente de la Royal
Society*

PARA LEER MÁS

Para una discusión más detallada de los temas abordados en este documento (incluidas las referencias a la investigación original subyacente), consulte:

- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2019: *Informe especial sobre el océano y la criosfera en un clima cambiante* [<https://www.ipcc.ch/srocc>]
- Academias Nacionales de Ciencias, Ingeniería y Medicina (NASEM, por sus siglas en inglés), 2019: *Tecnologías de Emisiones Negativas y Secuestro Confiable: Una Agenda de Investigación* [<https://www.nap.edu/catalog/25259>]
- Royal Society, 2018: *Eliminación de gases de efecto invernadero* [<https://raeng.org.uk/greenhousegasremoval>]
- Programa de Investigación sobre el Cambio Global de los Estados Unidos (USGCRP, por sus siglas en inglés), 2018: *Cuarta Evaluación Nacional del Clima Volumen II: Impactos, riesgos y adaptación en los Estados Unidos* [<https://nca2018.globalchange.gov>]
- IPCC, 2018: Calentamiento global de 1,5 °C [<https://www.ipcc.ch/sr15>]

- USGCRP, 2017: *Cuarta Evaluación Nacional del Clima Volumen I: Informes Especiales de la Ciencia del Clima* [<https://science2017.globalchange.gov>]
- NASEM, 2016: Atribución de eventos climáticos extremos en el contexto del cambio climático [<https://www.nap.edu/catalog/21852>]
- IPCC, 2013: *Grupo de Trabajo 1 del Quinto Informe de Evaluación (AR5). Cambio Climático 2013: La Base de la Ciencia Física* [<https://ipcc.ch/report/ar5/wg1>]
- NRC, 2013: Impactos abruptos del cambio climático: anticipando sorpresas [<https://www.nap.edu/catalog/18373>]
- NRC, 2011: *Objetivos de estabilización climática: emisiones, concentraciones e impactos a lo largo de décadas a milenios* [<https://www.nap.edu/catalog/12877>]
- Royal Society 2010: *America's Climate Choices: Advancing the Science of Climate Change* [<https://royalsociety.org/topics-policy/publications/2010/climate-change-summery-science>]
- NRC, 2010: *America's Climate Choices: Advancing the Science of Climate Change (Las opciones climáticas de Estados Unidos: Avanzando en la ciencia del cambio climático)* [<https://www.nap.edu./catalog/12782>]

Gran parte de los datos originales en los que se basan los hallazgos científicos que se analizan aquí están disponibles en:

- <https://data.ucar.edu/>
- <https://climatedataguide.ucar.edu>
- <https://iridl.ldeo.columbia.edu>
- <https://ess-dive.lbl.gov>
- <https://www.ncdc.noaa.gov/>
- <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- <https://scrippsco2.ucsd.edu>
- <https://hahana.soest.hawaii.edu/hot>

La Academia Nacional de Ciencias (NAS) se estableció para asesorar a los Estados Unidos en cuestiones científicas y técnicas cuando el presidente Lincoln firmó una carta del Congreso en 1863. El Consejo Nacional de Investigación, el brazo operativo de la Academia Nacional de Ciencias y la Academia Nacional de Ingeniería, ha publicado numerosos informes sobre las causas y las posibles respuestas al cambio

climático. Los recursos sobre el cambio climático del Consejo Nacional de Investigación están disponibles en nationalacademies.org/climate.

LA ROYAL SOCIETY es una asociación autónoma de muchos de los científicos más distinguidos del mundo. Sus miembros provienen de todas las áreas de la ciencia, la ingeniería y la medicina. Es la academia nacional de ciencias del Reino Unido. El propósito fundamental de la Sociedad, reflejado en sus Cartas fundacionales de la década de 1660, es reconocer, promover y apoyar la excelencia en la ciencia, y fomentar el desarrollo y el uso de la ciencia en beneficio de la humanidad. Más información sobre el trabajo de la Sociedad en materia de cambio climático está disponible en royalsociety.org/policy/climate-change

CONTENIDO

Resumen	2
Preguntas y respuestas sobre el cambio climático	
1. El clima se está calentando?	3
2. Cómo saben los científicos que el cambio climático reciente es causado en gran medida por las actividades humanas?	5
3. El CO ₂ ya está en la atmósfera de forma natural, ¿por qué son significativas las emisiones de la actividad humana?	6
4. Qué papel ha jugado el Sol en el cambio climático en las últimas décadas?.....	7
5. Qué nos dicen los cambios en la estructura vertical de la temperatura atmosférica — desde la superficie hasta la estratosfera— acerca de las causas del cambio climático reciente? ..	8
6. El clima siempre está cambiando. ¿Por qué el cambio climático es motivo de preocupación ahora?	9
7. El nivel actual de concentración de CO ₂ atmosférico no tiene precedentes en la historia de la Tierra?	9
8. Hay algún punto en el que añadir más CO ₂ no provoque un mayor calentamiento?	10
9. Varía la tasa de calentamiento de una década a otra?	11
10. La desaceleración del calentamiento durante la década de 2000 hasta principios de la década de 2010 significó que el cambio climático ya no está ocurriendo?.....	12
Los fundamentos del cambio climático	B1-B8
Preguntas y respuestas sobre el cambio climático (continuación)	
11. Si el mundo se está calentando, ¿por qué algunos inviernos y veranos todavía muy fríos?	13
12. Por qué está disminuyendo el hielo marino del Ártico mientras que el hielo marino de la Antártida ha cambiado poco?	14
13. Cómo afecta el cambio climático a la intensidad y frecuencia de las inundaciones, las sequías, los huracanes y los tornados?	15
14. A qué velocidad está subiendo el nivel del mar?.....	16
15. Qué es la acidificación de los océanos y por qué es importante?.....	17
16. Qué tan seguros están los científicos de que la Tierra se calentará aún más en el próximo ¿siglo?	18
17. ¿Son preocupantes los cambios climáticos de unos pocos grados?	19
18. ¿Qué están haciendo los científicos para abordar las principales incertidumbres de nuestra comprensión del sistema climático?.....	19
19. ¿Son motivo de preocupación los escenarios de desastre sobre puntos de inflexión como "apagar el Estrecho del Golfo" y la liberación de metano del Ártico?.....	21
20. Si se detuvieran las emisiones de gases de efecto invernadero, ¿volvería el clima a las condiciones de hace 200 años?	22
Conclusión	23
Agradecimientos	24

RESUMEN

Los GASES DE EFECTO INVERNADERO como el dióxido de carbono (CO₂) absorben el calor (radiación infrarroja) emitido por la superficie de la Tierra. Los aumentos en las concentraciones atmosféricas de estos gases hacen que la Tierra se caliente al atrapar más de este calor. Las actividades humanas, especialmente la quema de combustibles fósiles desde el inicio de la Revolución Industrial, han aumentado las concentraciones de CO₂ atmosférico en más del 40%, y más de la mitad del aumento se ha producido desde 1970. Desde 1900, la temperatura media mundial de la superficie ha aumentado aproximadamente 1 °C (1,8 °F). Esto ha ido acompañado de un calentamiento del océano, un aumento del nivel del mar, una fuerte disminución del hielo marino del Ártico, aumentos generalizados de la frecuencia e intensidad de las olas de calor y muchos otros efectos climáticos asociados. Gran parte de este calentamiento ha ocurrido en las últimas cinco décadas. Los análisis detallados han demostrado que el calentamiento durante este período es principalmente el resultado del aumento de las concentraciones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero. Las emisiones continuas de estos gases provocarán un mayor cambio climático, incluidos aumentos sustanciales de la temperatura media mundial de la superficie y cambios importantes en el clima regional. La magnitud y el momento de estos cambios dependerán de muchos factores, y seguirán produciéndose desaceleraciones y aceleraciones del calentamiento que durarán una década o más. Sin embargo, el cambio climático a largo plazo a lo largo de muchas décadas dependerá principalmente de la cantidad total de CO₂ y otros gases de efecto invernadero emitidos como resultado de las actividades humanas.

P&R

1 SE ESTÁ CALENTANDO EL CLIMA?

Sí. La temperatura media del aire en la superficie de la Tierra ha aumentado aproximadamente 1 °C (1,8 °F) desde 1900, y más de la mitad del aumento se ha producido desde mediados de la década de 1970 [Figura 1a]. Una amplia gama de otras observaciones (como la reducción de la extensión del hielo marino del Ártico y el aumento del contenido de calor oceánico) e indicaciones del mundo natural (como los desplazamientos hacia los polos de especies de peces, mamíferos, insectos sensibles a la temperatura, etc.) proporcionan pruebas incontrovertibles del calentamiento a escala planetaria.

La evidencia más clara del calentamiento de la superficie proviene de los registros generalizados de termómetros que, en algunos lugares, se remontan a finales del siglo XIX. Hoy en día, las temperaturas se monitorean en muchos miles de lugares, tanto en la superficie terrestre como en la oceánica. Las estimaciones indirectas del cambio de temperatura a partir de fuentes tales como los anillos de los árboles y los núcleos de hielo ayudan a situar los cambios recientes de temperatura en el contexto del pasado. En cuanto a la temperatura media de la superficie de la Tierra, estas estimaciones indirectas muestran que entre 1989 y 2019 fue muy probablemente el período de 30 años más cálido en más de 800 años; La década más reciente, 2010-2019, es la más cálida en el registro instrumental hasta ahora (desde 1850).

Una amplia gama de otras observaciones proporciona una imagen más completa del calentamiento en todo el sistema climático. Por ejemplo, la atmósfera inferior y las capas superiores del océano también se han calentado, la capa de nieve y hielo está disminuyendo en el hemisferio norte, la capa de hielo de Groenlandia se está reduciendo y el nivel del mar está aumentando [Figura 1b]. Estas mediciones se realizan con una variedad de sistemas de monitoreo terrestres, oceánicos y espaciales, lo que brinda mayor confianza en la realidad del calentamiento a escala global del clima de la Tierra.

FIGURE1A. La temperatura media global de la superficie de la Tierra ha aumentado, como se muestra en este gráfico de mediciones combinadas de tierra y océano desde 1850 hasta 2019, derivadas de tres análisis independientes de los conjuntos de datos disponibles. Los cambios de temperatura son relativos a la temperatura media mundial de la superficie de 1961-1990.

Fuente: NOAA Climate. Gov; datos del Centro Hadley de la Oficina Meteorológica del Reino Unido (granate), el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de EE. UU. (rojo) y los Centros Nacionales de Información Ambiental de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE. UU. (naranja).

□ **P&R**

FIGURA 1B. Una gran cantidad de evidencia observacional, además de los registros de temperatura de la superficie, muestra que el clima de la Tierra está cambiando. Por ejemplo, se puede encontrar evidencia adicional de una tendencia al calentamiento en la disminución dramática de la extensión del hielo marino del Ártico en su mínimo de verano (que ocurre en septiembre), la disminución de la capa de nieve en junio en el hemisferio norte, los aumentos en el contenido superior del océano promedio mundial (superior a 700 m o 2300 pies) (que se muestra en relación con el promedio de 1955-2006), y el aumento del nivel de SE global. *Fuente: NOAA Climate.gov*

2 CÓMO SABE EL CIENTÍFICO QUE EL CAMBIO CLIMÁTICO RECIENTE ES CAUSADO EN GRAN MEDIDA POR LAS ACTIVIDADES HUMANAS?

Los científicos saben que el cambio climático reciente es causado en gran medida por las actividades humanas a partir de una comprensión de la física básica, la comparación de las observaciones con los modelos y la toma de huellas dactilares de los patrones detallados del cambio climático causado por diferentes influencias humanas y naturales.

Desde mediados del siglo XIX, los científicos saben que el CO₂ es uno de los principales gases de efecto invernadero de importancia para el equilibrio energético de la Tierra. Las mediciones directas del CO₂ en la atmósfera y en el aire atrapado en el hielo muestran que el CO₂ atmosférico aumentó más del 40% entre 1800 y 2019. Las mediciones de diferentes formas de carbono (isótopos, véase la pregunta 3) revelan que este aumento se debe a las actividades humanas. Otros gases de efecto invernadero (en particular el metano y el óxido nitroso) también están aumentando como consecuencia de las actividades humanas. El aumento observado de la temperatura global de la superficie desde 1900 es consistente con cálculos detallados de los impactos del aumento observado en los gases de efecto invernadero atmosféricos (y otros cambios inducidos por el hombre) en el balance energético de la Tierra.

Las diferentes influencias sobre el clima tienen diferentes firmas en los registros climáticos. Estas huellas dactilares únicas son más fáciles de ver si se sondea más allá de un solo número (como la temperatura media de la superficie de la Tierra) y, en cambio, se observan los patrones geográficos y estacionales del cambio climático. Los patrones observados de calentamiento de la superficie, cambios de temperatura a través de la atmósfera, aumentos en el contenido de calor de los océanos, aumentos en la humedad atmosférica, aumento del nivel del mar y aumento del derretimiento del hielo terrestre y marino también coinciden con los patrones que los científicos esperan ver debido a las actividades humanas (ver Pregunta 5).

Los cambios esperados en el clima se basan en nuestra comprensión de cómo los gases de efecto invernadero atrapan el calor. Tanto esta comprensión fundamental de la física de los gases de efecto invernadero como los estudios de huellas dactilares basados en patrones muestran que las causas naturales por sí solas son inadecuadas para explicar

los cambios recientes observados en el clima. Las causas naturales incluyen variaciones en la producción del Sol y en la órbita de la Tierra alrededor del Sol, erupciones volcánicas y fluctuaciones internas en el sistema climático (como El Niño y La Niña). Los cálculos que utilizan modelos climáticos (véase el recuadro, pág. 20) se han utilizado para simular lo que habría ocurrido con las temperaturas globales si sólo los factores naturales influyeran en el sistema climático. Estas simulaciones producen poco calentamiento superficial o incluso un ligero enfriamiento, a lo largo del siglo XX y en el XXI. Sólo cuando los modelos incluyen influencias humanas en la composición de la atmósfera, los cambios de temperatura resultantes son consistentes con los cambios observados.

□ P&R

3 EL CO₂ YA ESTÁ EN LA ATMÓSFERA DE FORMA NATURAL, ENTONCES, ¿POR QUÉ SON SIGNIFICATIVAS LAS EMISIONES DE LA ACTIVIDAD HUMANA?

Las actividades humanas han perturbado significativamente el ciclo natural del carbono al extraer combustibles fósiles enterrados durante mucho tiempo y quemarlos para obtener energía, liberando así CO₂ a la atmósfera.

En la naturaleza, el CO₂ se intercambia continuamente entre la atmósfera, las plantas y los animales a través de la fotosíntesis, la respiración y la descomposición, y entre la atmósfera y el océano a través del intercambio de gases. Una cantidad muy pequeña de CO₂ (aproximadamente el 1% de la tasa de emisión de la combustión de combustibles fósiles) también se emite en las erupciones volcánicas. Esto se equilibra con una cantidad equivalente que se elimina mediante la meteorización química de las rocas.

El nivel de CO₂ en 2019 fue más de un 40% más alto que en el siglo XIX. La mayor parte de este aumento del CO₂ se ha producido desde 1970, más o menos en la época en que se aceleró el consumo mundial de energía. Las disminuciones medidas en la fracción de otras formas de carbono (los isótopos ¹³C y ¹⁴C) y una pequeña disminución en la concentración de oxígeno atmosférico (cuyas observaciones han estado disponibles desde 1990) muestran que el aumento del CO₂ se debe en gran medida a la combustión de combustibles fósiles (que tienen fracciones bajas de ¹³C y no ¹⁴C). La deforestación ha alterado el equilibrio del ciclo del carbono, porque los procesos naturales que podrían restablecer el equilibrio son demasiado lentos en comparación con las tasas a las que las actividades humanas están añadiendo CO₂ a la atmósfera. Como resultado, una fracción sustancial del CO₂ emitido por las actividades humanas se acumula en la atmósfera, donde parte permanecerá no solo durante décadas o siglos, sino durante miles de años. La comparación con los niveles de CO₂ medidos en el aire extraído de los núcleos de hielo indica que las concentraciones actuales son sustancialmente más altas de lo que han sido en al menos 800.000 años (véase la pregunta 6).¹⁴C

6 CAMBIO CLIMÁTICO

4 QUÉ PAPEL HA JUGADO EL SOL EN EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ÚLTIMAS DÉCADAS?

El Sol proporciona la principal fuente de energía que impulsa el sistema climático de la Tierra, pero sus variaciones han desempeñado muy poco papel en el cambio climático observado en las últimas décadas. Las mediciones satelitales directas desde finales de la década de 1970 no muestran un aumento neto en la producción del Sol, mientras que al mismo tiempo las temperaturas globales de la superficie han aumentado [FIGURA 2].

Para los períodos anteriores al inicio de las mediciones satelitales, el conocimiento sobre los cambios solares es menos seguro porque los cambios se infieren de fuentes indirectas, incluido el número de manchas solares y la abundancia de ciertas formas (isótopos) de átomos de carbono o berilio, cuyas tasas de producción en la atmósfera de la Tierra están influenciadas por las variaciones en el Sol. Durante el cual la producción de energía del Sol varía en aproximadamente un 0,1%, puede influir en las concentraciones de ozono, las temperaturas y los vientos en la estratosfera (la capa de la atmósfera por encima de la troposfera, generalmente de 12 a 50 km sobre la superficie de la Tierra, dependiendo de la latitud y la estación). Estos cambios estratosféricos pueden tener un pequeño efecto en el clima de la superficie durante el ciclo de 11 años. Sin embargo, la evidencia disponible no indica cambios pronunciados a largo plazo en la producción del Sol durante el siglo pasado, tiempo durante el cual los aumentos inducidos por el hombre en las concentraciones de CO₂ han sido una influencia dominante en el aumento de la temperatura de la superficie global a largo plazo. Se puede encontrar más evidencia de que el calentamiento actual no es el resultado de los cambios solares en las tendencias de temperatura a diferentes altitudes en la atmósfera (ver Pregunta 5).

FIGURA 2. Las mediciones de la energía del Sol incidente en la Tierra no muestran un aumento neto en el forzamiento solar durante los últimos 40 años y, por lo tanto, esto no puede ser responsable del calentamiento durante ese período. Los datos muestran solo pequeñas variaciones periódicas de amplitud asociadas con el ciclo de 11 años del Sol. *Fuente: Datos del TSI del Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, Suiza, sobre la nueva escala VIRGO desde 1978 hasta mediados de 2018; datos de temperatura para el mismo período de tiempo del conjunto de datos HadCRUT4, Oficina Meteorológica del Reino Unido, Centro Hadley.*

□ P&R

5 QUÉ SON LOS CAMBIOS EN LA ESTRUCTURA VERTICAL DE LA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA, DESDE LA SUPERFICIE HASTA LA ESTRATOSFERA, LAS CAUSAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO RECIENTE?

El calentamiento observado en la atmósfera inferior y el enfriamiento en la atmósfera superior nos proporcionaron información clave sobre las causas subyacentes del cambio climático y revelan que los factores naturales por sí solos no pueden explicar los cambios observados.

A principios de la década de 1960, los resultados de los modelos matemáticos/físicos de los sistemas climáticos mostraron por primera vez que se esperaba que los aumentos de CO₂ inducidos por el hombre condujeran a un calentamiento gradual de la atmósfera inferior (la troposfera) y al enfriamiento de los niveles superiores de la atmósfera (la estratosfera). Por el contrario, los aumentos en la producción del Sol calentarían tanto la troposfera como toda la extensión vertical de la estratosfera. En ese momento, no había suficientes datos observacionales para probar esta predicción, pero las mediciones de temperatura de los globos meteorológicos y los satélites han confirmado desde entonces estos primeros pronósticos. Ahora se sabe que el patrón observado de calentamiento troposférico y enfriamiento estratosférico en los últimos 40 años es ampliamente consistente con las simulaciones de modelos informáticos que incluyen aumentos en el CO₂ y disminuciones en el ozono estratosférico, cada uno causado por actividades humanas. El patrón observado no es consistente con los cambios puramente naturales en la producción de energía del Sol, la actividad volcánica. O variaciones climáticas naturales como El Niño y La Niña.

A pesar de esta concordancia entre los patrones a escala global de los cambios de temperatura atmosférica modelados y observados, todavía existen algunas diferencias. Las diferencias más notables se encuentran en los trópicos, donde los modelos muestran actualmente un mayor calentamiento en la troposfera que se ha observado, y en el Ártico, donde el calentamiento observado de la troposfera es mayor que en la mayoría de los modelos.

6 EL CLIMA SIEMPRE ESTÁ CAMBIANDO, ¿POR QUÉ EL CAMBIO CLIMÁTICO ES MOTIVO DE PREOCUPACIÓN AHORA?

Todos los cambios climáticos importantes, incluidos los naturales, son perjudiciales. Los cambios climáticos pasados condujeron a la extinción de muchas especies, migraciones de poblaciones y cambios pronunciados en la superficie terrestre y la circulación oceánica. La velocidad del cambio climático actual es más rápida que la mayoría de los eventos pasados, lo que dificulta la adaptación de las sociedades humanas y del mundo natural.

Las mayores variaciones climáticas a escala global en el pasado geológico reciente de la Tierra son los ciclos de la edad de hielo (véase el recuadro, p.B4), que son períodos glaciares fríos seguidos de períodos cálidos más cortos [FIGURA 3]. Los últimos de estos ciclos naturales se han repetido aproximadamente cada 100.000 años. Son principalmente marcados por cambios lentos en la órbita de la Tierra, que alteran la forma en que se distribuye la energía del Sol con la latitud y por estación en la Tierra. Estos cambios orbitales son muy pequeños en los últimos cientos de años, y por sí solos no son suficientes para causar la magnitud observada del cambio de temperatura desde la Revolución Industrial, ni para actuar sobre toda la Tierra. En las escalas de tiempo de la edad de hielo, estas variaciones orbitales graduales han provocado cambios en la extensión de las capas de hielo y en la abundancia de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, que a su vez han amplificado el cambio de temperatura inicial.

Las estimaciones recientes del aumento de la temperatura media mundial desde el final de la última glaciación son de 4 a 5 °C (7 a 9 °F). Ese cambio ocurrió durante un período de unos 7.000 años, comenzando hace 18.000 años. El CO₂ ha aumentado más del 40% en los últimos 200 años, gran parte de esto desde la década de 1970, contribuyendo a la alteración humana del presupuesto energético del planeta que hasta ahora ha calentado la Tierra en aproximadamente 1 °C (1,8 °F). Si el aumento del CO₂ continúa sin control, se puede esperar un calentamiento de la misma magnitud que el aumento de la edad de hielo a finales de este siglo o poco después. Esta velocidad de calentamiento es más de

diez veces mayor que al final de una edad de hielo, el cambio natural sostenido más rápido conocido a escala global.

7 EL NIVEL ACTUAL DE CONCENTRACIÓN DE CO₂ ATMOSFÉRICO NO TIENE PRECEDENTES EN LA HISTORIA DE LA TIERRA?

Es casi seguro que el nivel actual de concentración de CO₂ atmosférico no tiene precedentes en el último millón de años, tiempo durante el cual los humanos modernos evolucionaron y las sociedades se desarrollaron. Sin embargo, la concentración de CO₂ atmosférico era mayor en el pasado más lejano de la Tierra (hace muchos millones de años), momento en el que los datos paleoclimáticos y geológicos indican que las temperaturas y el nivel del mar también son más altos que en la actualidad.

Las mediciones del aire en núcleos muestran que durante los últimos 800.000 años hasta el siglo XX, la concentración de CO₂ atmosférico se mantuvo dentro del rango de 170 a 300 partes por millón (ppm), lo que hace que el rápido aumento reciente a más de 400 ppm en 200 años sea particularmente notable [FIGURA 3]. Durante los ciclos glaciares de los últimos 800.000 años, tanto el CO₂ como el metano han actuado como importantes amplificadores de los cambios climáticos provocados por las variaciones en la órbita de la Tierra alrededor del Sol. A medida que la Tierra se calentaba desde la última glaciación, la temperatura

Continuado

□ P&R

y el CO₂ comenzó a aumentar aproximadamente al mismo tiempo y continuó aumentando en tándem desde hace unos 18.000 a 11.000 años. Los cambios en la temperatura, la circulación, la química y la biología del océano hicieron que el CO₂ se liberara a la atmósfera, lo que se combinó con otras retroalimentaciones para empujar a la Tierra a un estado aún más cálido. Para épocas geológicas anteriores, las concentraciones de CO₂ y las temperaturas se han inferido a partir de métodos menos directos. Estos sugieren que la concentración de CO₂ se acercó por última vez a 400 ppm hace unos 3 a 5 millones de años, un período en el que se estima que la temperatura media mundial de la superficie fue entre 2 y 3,5 °C más alta que en el período preindustrial. Hace 50 millones de años, el CO₂ pudo haber alcanzado las 1000 ppm, y la temperatura media mundial era probablemente unos 10 °C más cálida que la actual. En esas condiciones, la Tierra tenía poco hielo y el nivel del mar era al menos 60 metros más alto que los niveles actuales.

Figura 3. Los datos de los núcleos de hielo se han utilizado para reconstruir las temperaturas de la Antártida y las concentraciones de CO₂ atmosférico durante los últimos 800.000 años. La temperatura se basa en las mediciones del contenido isotópico del agua en el núcleo de hielo del Domo C. El CO₂ se mide en el aire atrapado en el hielo y es un compuesto del núcleo de hielo Dome C y Vostok. La concentración actual de CO₂ (punto azul) proviene de mediciones atmosféricas. El patrón cíclico de las variaciones de temperatura constituye la edad de hielo/ciclos interglaciares. Durante estos ciclos, los cambios en las concentraciones de CO₂ (en azul) siguen de cerca los cambios en la temperatura (en naranja). Como muestra el registro, el reciente aumento de la concentración de CO₂ atmosférico no tiene precedentes en los últimos 800.000 años. La concentración de CO₂ atmosférico superó las 400 ppm en 2016, y la concentración media en 2019 fue de más de 411 ppm. *Fuente: Basado en datos de Jeremy Shakun, datos de Lüthi et al., 2008 y Jouzel et al., 2007*

8 HAY ALGÚN PUNTO EN EL QUE AÑADIR MÁS CO₂ NO PROVOQUE UN MAYOR CALENTAMIENTO?

No. Agregar más CO₂ a la atmósfera hará que las temperaturas de la superficie continúen aumentando. A medida que aumentan las concentraciones atmosféricas de CO₂, la adición de CO₂ adicional se vuelve progresivamente menos efectiva para atrapar la energía de la Tierra, pero la temperatura de la superficie seguirá aumentando.

Nuestra comprensión de la física por la cual el CO₂ afecta el balance energético de la Tierra está confirmada por mediciones de laboratorio, así como por observaciones detalladas de satélite y de superficie de la emisión y absorción de energía infrarroja por la atmósfera. Los gases de efecto invernadero absorben parte de la energía infrarroja que emite la Tierra en las llamadas bandas de absorción más fuerte que se producen en ciertas longitudes de onda. Diferentes gases absorben energía en diferentes longitudes de onda. El CO₂ tiene su banda de captura de calor más fuerte centrada en una longitud de onda de 15 micrómetros (millonésimas de metro), con una absorción que se extiende unos pocos micrómetros a cada lado. También hay muchas bandas de absorción más débiles. A medida que aumentan las concentraciones de CO₂, la absorción en el centro de la banda fuerte ya es tan intensa que desempeña poco papel en la causa de un calentamiento adicional. Sin embargo, se absorbe más energía en las bandas más débiles y lejos del centro de la banda fuerte, lo que hace que la superficie y la atmósfera inferior se calienten aún más.

9 VARÍA LA TASA DE CALENTAMIENTO DE UNA DÉCADA A OTRA?

Sí. La tasa de calentamiento observada ha variado de un año a otro, de una década a otra y de un lugar a otro, como es de esperar a partir de nuestra comprensión del sistema climático. Estas variaciones a corto plazo se deben principalmente a causas naturales, y no contradicen nuestra comprensión fundamental de que la tendencia al calentamiento a largo plazo se debe principalmente a los cambios inducidos por el hombre en los niveles atmosféricos de CO₂ y otros gases de efecto invernadero.

A pesar de que el CO₂ aumenta constantemente en la atmósfera, lo que lleva a un calentamiento gradual de la superficie de la Tierra, muchos factores naturales están modulando este calentamiento a largo plazo. Las grandes erupciones volcánicas aumentan el número de pequeñas partículas en la estratosfera. Estas partículas reflejan la luz solar, lo que lleva a un enfriamiento superficial a corto plazo que dura típicamente de dos a tres años, seguido de una recuperación lenta. La circulación y la mezcla oceánicas varían naturalmente en muchas escalas de tiempo, causando variaciones en las temperaturas de la superficie del mar, así como cambios en la velocidad a la que el calor se transporta a mayores profundidades. Por ejemplo, el Pacífico tropical oscila entre eventos cálidos de El Niño y eventos más fríos de La Niña en escalas de tiempo de dos a siete años. Los científicos estudian muchos tipos diferentes de variaciones climáticas, como las de las escalas de tiempo decenales y multidecenales en los océanos Pacífico y Atlántico Norte. Cada tipo de variación tiene sus propias características únicas. Estas variaciones oceánicas están asociadas con cambios regionales y globales significativos en los patrones de temperatura y precipitación que son evidentes en las observaciones.

El calentamiento de una década a otra también puede verse afectado por factores humanos, como las variaciones en las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles (partículas en el aire que pueden tener efectos tanto de calentamiento como de enfriamiento) de las centrales eléctricas de carbón y otras fuentes de contaminación.

Estas variaciones en la tendencia de la temperatura son claramente evidentes en el registro de temperatura observado [FIGURA 4]. Las variaciones climáticas naturales a corto plazo también podrían afectar a la señal de cambio climático inducido por el hombre a largo plazo y viceversa, ya que las variaciones climáticas en diferentes escalas espaciales y temporales pueden interactuar entre sí. Es en parte por esta razón que las

proyecciones del cambio climático se realizan utilizando modelos climáticos (véase el recuadro, pág. 20) que pueden dar cuenta de muchos tipos diferentes de variaciones climáticas y sus interacciones. Las inferencias fiables sobre el cambio climático inducido por el hombre deben hacerse con una visión a más largo plazo, utilizando registros que abarquen muchas décadas.

FIGURA 4. El sistema climático varía naturalmente de un año a otro y de una década a otra. Para hacer inferencias fiables sobre el cambio climático inducido por el hombre, se suelen utilizar registros multidecenales y más largos. Calcular un "promedio móvil" en estas escalas de tiempo más largas permite ver más fácilmente las tendencias a largo plazo. Para la temperatura media mundial para el período 1850-2019 (utilizando los datos del Centro Hadley de la Oficina Meteorológica del Reino Unido en relación con el promedio de 1961-90), los gráficos muestran (arriba) el promedio y el rango de incertidumbre para los datos promediados anualmente; (2ª gráfica) la temperatura media anual de los diez años centrados en una fecha determinada; (3ª parcela) la imagen equivalente para 30 años; y (4º gráfico) los promedios de 60 años. *Fuente: Met Office Hadley Centre, basado en el conjunto de datos HadCRUT4 de la Met Office y la Unidad de Investigación Climática (Morice et al., 2012).*

□ P&R

10 LA DESACELERACIÓN DEL CALENTAMIENTO DURANTE LA DÉCADA DE 2000 Y PRINCIPIOS DE LA DE 2010 SIGNIFICÓ QUE EL CAMBIO CLIMÁTICO YA NO ESTÁ OCURRIENDO?

No. Después del año muy cálido de 1998 que siguió al fuerte fenómeno de El Niño de 1997-98, el aumento de la temperatura media de la superficie se ralentizó en relación con el decenio anterior de rápidos aumentos de la temperatura. A pesar de la tasa más lenta de calentamiento, la década de 2000 fue más cálida que la de 1990. El período limitado de calentamiento más lento terminó con un salto dramático a temperaturas más cálidas entre 2014 y 2015, con todos los años de 2015 a 2019 más cálidos que cualquier año anterior en el registro instrumental. Una desaceleración a corto plazo en el calentamiento de la superficie de la Tierra no invalida nuestra comprensión de los cambios a largo plazo en la temperatura global que surgen de los cambios inducidos por el hombre en los gases de efecto invernadero.

Décadas de calentamiento lento, así como décadas de calentamiento acelerado, ocurren naturalmente en el sistema climático. Las décadas que son frías o cálidas en comparación con la tendencia a largo plazo se observan en las observaciones de los últimos 150 años y también son capturadas por los modelos climáticos. Debido a que la atmósfera almacena muy poco calor, las temperaturas de la superficie pueden verse afectadas rápidamente por la absorción de calor en otras partes del sistema climático y por los cambios en las influencias externas en el clima (como las partículas formadas a partir de material elevado a la atmósfera por erupciones volcánicas).

Más del 90% del calor añadido al sistema terrestre en las últimas décadas ha sido absorbido por los océanos y penetra lentamente en las aguas profundas. Una tasa más rápida de penetración de calor en las profundidades del océano ralentizará el calentamiento observado en la superficie y en la atmósfera, pero por sí sola no cambiará el calentamiento a largo plazo que se producirá a partir de una cantidad determinada de CO₂. Por ejemplo, estudios recientes muestran que parte del calor sale del océano a la atmósfera durante los eventos cálidos de El Niño, y más calor penetra a las profundidades del océano en los fríos eventos de La Niña. Estos cambios se producen repetidamente a lo largo de períodos de tiempo de décadas o más. Un ejemplo es el gran evento de El Niño en 1997-98, cuando la temperatura del aire promedio a nivel mundial

se disparó al nivel más alto en el siglo XX a medida que el océano perdía calor a la atmósfera, principalmente por evaporación.

Incluso durante la desaceleración del aumento de la temperatura media de la superficie, seguía siendo evidente una tendencia al calentamiento a largo plazo (véase la Figura 4). Durante ese período, por ejemplo, se documentaron olas de calor récord en Europa (verano de 2003), en Rusia (verano de 2010), en Estados Unidos (julio de 2012) y en Australia (enero de 2013). Cada una de las últimas cuatro décadas fue más cálida que cualquier década anterior desde que se introdujeron las mediciones generalizadas de termómetros en la década de 1850. Los efectos continuos del calentamiento del clima se observan en las tendencias crecientes en el contenido de calor de los océanos y el nivel del mar, así como en el continuo derretimiento del hielo marino del Ártico, los glaciares y la capa de hielo de Groenlandia.

LOS FUNDAMENTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los gases de efecto invernadero afectan el equilibrio energético y el clima de la Tierra

El Sol sirve como la principal fuente de energía para el clima de la Tierra. Parte de la luz solar entrante se refleja directamente en el espacio, especialmente por superficies brillantes como el hielo y las nubes, y el resto es absorbido por la superficie y la atmósfera. Gran parte de esta energía solar absorbida se reemite en forma de calor (onda larga o radiación infrarroja). La atmósfera, a su vez, absorbe y vuelve a irradiar calor, parte del cual se escapa al espacio. Cualquier perturbación de este equilibrio de energía entrante y saliente afectará al clima. Por ejemplo, pequeños cambios en la producción de energía del Sol afectarán directamente a este equilibrio.

Si toda la energía térmica emitida desde la superficie pasara a través de la atmósfera directamente al espacio, la temperatura media de la superficie de la Tierra sería decenas de grados más fría que en la actualidad. Los gases de efecto invernadero en la atmósfera, incluidos el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, actúan para hacer que la superficie sea mucho más cálida que esto porque absorben y emiten energía térmica en todas las direcciones (incluso hacia abajo), manteniendo caliente la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior [Figura B1]. Sin este efecto invernadero, la vida tal y como la conocemos no podría haber evolucionado en nuestro planeta. La adición de más gases de efecto invernadero a la atmósfera la hace aún más eficaz para evitar que el calor se escape al espacio. Cuando la energía que sale es menor que la energía que entra, la Tierra se calienta hasta que se establece un nuevo equilibrio.

FIGURA B1. Los gases de efecto invernadero en la atmósfera, incluidos el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, absorben energía térmica y la emiten en todas las direcciones (incluso hacia abajo), manteniendo caliente la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior. La adición de más gases de efecto invernadero a la atmósfera mejora el efecto, haciendo que la superficie de la Tierra y la atmósfera inferior sean aún más cálidas. Imagen basada en una cifra de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.

FUNDAMENTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los gases de efecto invernadero emitidos por las actividades humanas alteran el equilibrio energético de la Tierra y, por lo tanto, su clima. Los seres humanos también afectan al clima cambiando la naturaleza de las superficies terrestres (por ejemplo, talando bosques para la agricultura) y mediante la emisión de contaminantes que afectan la cantidad y el tipo de partículas en la atmósfera.

Los científicos han determinado que, cuando se consideran todos los factores humanos y naturales, el equilibrio climático de la Tierra se ha alterado hacia el calentamiento, siendo el mayor contribuyente el aumento del CO₂.

Las actividades humanas han añadido gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso han aumentado significativamente desde que comenzó la Revolución Industrial. En el caso del dióxido de carbono, la concentración media medida en el Observatorio de Mauna Loa, en Hawái, ha pasado de 316 partes por millón (ppm)¹ en 1959 (el primer año completo de datos disponibles) a más de 411 ppm en 2019 [Figura B2]. Desde entonces, se han registrado las mismas tasas de aumento en muchas otras estaciones de todo el mundo. Desde la época preindustrial, la concentración atmosférica de CO₂ ha aumentado en más de un 40%, el metano ha aumentado en más de un 150% y el óxido nitroso ha aumentado aproximadamente un 20%. Más de la mitad del aumento del CO₂ se ha producido desde 1970. Los aumentos de los tres gases contribuyen al calentamiento de la Tierra, siendo el aumento del CO₂ el que desempeña el papel más importante. Consulte la página B3 para obtener información sobre las fuentes de gases de efecto invernadero emitidos por el hombre.

Los científicos han examinado los gases de efecto invernadero en el contexto del pasado. El análisis del aire atrapado en el interior del hielo que se ha ido acumulando a lo largo del tiempo en la Antártida muestra que el CO₂.

FIGURA B2. Las mediciones de CO₂ atmosférico desde 1958 desde el Observatorio de Mauna Loa en Hawái (negro) y desde el Polo Sur (rojo) muestran un aumento anual constante en la concentración de CO₂ atmosférico. Las mediciones se realizan en lugares remotos como estos porque no están muy influenciados por los procesos locales, por lo que son representativos de la atmósfera de fondo. El pequeño patrón de dientes de sierra

hacia arriba y hacia abajo refleja los cambios estacionales en la liberación y absorción de CO₂ por parte de las plantas. *Fuente: Programa Scripps CO₂*

B2 CAMBIO CLIMÁTICO

FUNDAMENTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La concentración comenzó a aumentar significativamente en el siglo XIX [Figura B3], después de permanecer en el rango de 260 a 280 ppm durante los 10.000 años anteriores. Los registros de núcleos de hielo que se remontan a 800.000 años muestran que durante ese tiempo, las concentraciones de CO₂ se mantuvieron dentro del rango de 170 a 300 ppm a lo largo de muchos ciclos de la "edad de hielo". B4 para aprender sobre las edades de hielo, y no se observa ninguna concentración por encima de 300 ppm en los registros de núcleos de hielo hasta los últimos 200 años.

Figura B3. Las variaciones de CO₂ durante los últimos 1.000 años, obtenidas a partir del análisis del aire atrapado en un núcleo de hielo extraído de la Antártida (cuadrados rojos), muestran un fuerte aumento del CO₂ atmosférico a partir de finales del siglo XIX. Las mediciones atmosféricas modernas de Mauna Loa se superponen en gris. *Fuente: figura de Eric Wolff, datos de Etheridge et al., 1996; MacFarling Meure et al., 2006; Programa Scripps CO₂.*

Conozca las fuentes de gases de efecto invernadero emitidos por el hombre:

- **El dióxido de carbono (CO₂)** tiene fuentes naturales y humanas, pero los niveles de CO₂ están aumentando principalmente debido a la combustión de combustibles fósiles, la producción de cemento, la deforestación (que reduce el CO₂ absorbido por los árboles y aumenta el CO₂ liberado por la descomposición de los detritus) y otros cambios en el uso de la tierra. El aumento del CO₂ es el mayor contribuyente al calentamiento global.
- **El metano (CH₄)** tiene fuentes humanas y naturales, y los niveles han aumentado significativamente desde la época preindustrial debido a actividades humanas como la cría de ganado, el cultivo de arroz con cáscara, el llenado de vertederos y el uso de gas natural (que es principalmente CH₄, parte del cual puede liberarse cuando se extrae, transporta y utiliza).
- Las concentraciones de óxido nitroso (N₂O) han aumentado principalmente debido a actividades agrícolas como el uso de fertilizantes nitrogenados y los cambios en el uso de la tierra.

□ **Los halocarbonos**, incluidos los clorofluorocarbonos (CFC), son productos químicos utilizados como refrigerantes e ignífugos. Además de ser potentes gases de efecto invernadero, los CFC también dañan la capa de ozono. La producción de la mayoría de los CFC ha sido prohibida, por lo que su impacto está empezando a disminuir. Sin embargo, muchos sustitutos de los CFC son también potentes gases de efecto invernadero y sus concentraciones y las concentraciones de otros halocarbonos siguen aumentando.

EVIDENCIA Y CAUSAS 2020 **B3**

FUNDAMENTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Las mediciones de las formas (isótopos) de carbono en la atmósfera moderna muestran una clara huella dactilar de la adición de carbono "viejo" (empobrecido en ^{14}C radiactivo natural) proveniente de la combustión de combustibles fósiles (a diferencia del carbono "más nuevo" proveniente de los sistemas vivos). Además, se sabe que las actividades humanas (excluyendo los cambios en el uso de la tierra) emiten actualmente un estimado de 10 mil millones de toneladas de carbono cada año, principalmente por la quema de combustibles fósiles, lo que es más que suficiente para explicar el aumento observado en la concentración.

Estas y otras líneas de evidencia apuntan de manera concluyente al hecho de que la elevada concentración de CO_2 en nuestra atmósfera es el resultado de las actividades humanas.

Los registros climáticos muestran una tendencia al calentamiento.

La estimación del aumento de la temperatura media global del aire en la superficie requiere un análisis cuidadoso de millones de mediciones de todo el mundo, incluidas las de estaciones terrestres, barcos y satélites. A pesar de las muchas complicaciones de la síntesis de estos datos, varios equipos independientes han concluido por separado y por unanimidad que la temperatura media mundial del aire en la superficie ha aumentado aproximadamente $1\text{ }^\circ\text{C}$ ($1,8\text{ }^\circ\text{F}$) desde 1900 [Figura B4]. Aunque el registro muestra varias pausas y aceleraciones en la tendencia creciente, cada una de las últimas cuatro décadas ha sido más cálida que cualquier otra década en el registro instrumental desde 1850.

Si nos remontamos más atrás en el tiempo, antes de que los termómetros precisos estuvieran ampliamente disponibles, las temperaturas pueden reconstruirse utilizando indicadores sensibles al clima

Aprende sobre las edades de hielo:

Los análisis detallados de los sedimentos oceánicos, los núcleos de hielo y otros datos muestran que durante al menos los últimos 2,6 millones de años, la Tierra ha pasado por períodos prolongados en los que las temperaturas eran mucho más bajas que las actuales y gruesas capas de hielo cubrían grandes áreas del hemisferio norte. Estas largas olas de frío, que duraron en los ciclos más recientes durante unos 100.000 años, fueron interrumpidas por períodos "interglaciares" cálidos más cortos, incluidos los últimos 10.000 años.

A través de una combinación de teoría, observaciones y modelos, los científicos han deducido que las edades de hielo* son desencadenadas por variaciones recurrentes en la órbita de la Tierra que alteran principalmente la distribución regional y estacional de la energía solar que llega a la Tierra. Estos cambios relativamente pequeños en la energía solar se ven reforzados a lo largo de miles de años por cambios graduales en la cubierta de hielo de la Tierra (la criosfera), especialmente en el hemisferio norte, y en la composición atmosférica, lo que finalmente conduce a grandes cambios en la temperatura global. El cambio promedio de la temperatura global durante un ciclo de edad de hielo se estima en $5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($9\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{F}$).

* Tenga en cuenta que, en términos geológicos, la Tierra ha estado en una edad de hielo desde que la capa de hielo de la Antártida se formó por última vez hace unos 36 millones de años. Sin embargo, en este documento hemos utilizado el término en su uso más coloquial para indicar la aparición regular de extensas capas de hielo sobre América del Norte y el norte de Eurasia.