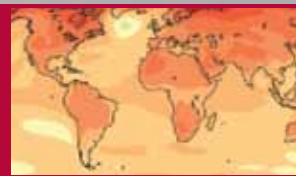


# CAMBIO CLIMÁTICO

EVIDENCIA,



IMPACTOS



Y OPCIONES



Respuestas a preguntas comunes sobre la ciencia del cambio climático

CONSEJO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
DE LAS ACADEMIAS NACIONALES

VERSIÓN EN ESPAÑOL PARA SU DIFUSIÓN GRATUITA A TRAVÉS DE IANAS  
THE INTER-AMERICAN NETWORK OF ACADEMIES OF SCIENCES

# CONTENIDO

## Parte I. Evidencia del cambio climático causado por el hombre 2

- ¿Cómo sabemos que la Tierra se ha calentado? 3
- ¿Cómo sabemos que los gases de efecto invernadero conducen al calentamiento? 4
- ¿Cómo sabemos que los seres humanos están causando el incremento de los gases con efecto invernadero? 6
- ¿Qué tanto están calentando las actividades humanas a la Tierra? 9
- ¿Cómo sabemos que la actual tendencia al calentamiento no es causada por el Sol? 11
- ¿Cómo sabemos que la actual tendencia al calentamiento no es causada por ciclos naturales? 12
- ¿Qué otros cambios climáticos e impactos han sido ya observados? 15
- Las glaciaciones 18

## Parte II. Calentamiento, cambio climático e impactos en el siglo XXI y más allá 20

- ¿Cómo proyectan los científicos el cambio climático a futuro? 21
- ¿Cómo se verán afectadas las temperaturas? 22
- ¿Cómo se espera que se modifiquen las precipitaciones? 23
- ¿Cómo se verán afectados los hielos marinos y la nieve? 26
- ¿Cómo se verán afectadas las líneas de costa? 26
- ¿Cómo se verán afectados los ecosistemas? 28
- ¿Cómo se verán afectadas la agricultura y la producción de alimentos? 29

## Parte III. Tomando decisiones sobre el cambio climático 30

- ¿De qué manera contribuye la ciencia a tomar decisiones sobre las emisiones? 31
- ¿Cuáles son las alternativas para reducir las emisiones de gases con efecto invernadero? 32
- ¿Cuáles son las alternativas de prevención ante los impactos del cambio climático? 34
- ¿Por qué se requiere realizar acciones dada la incertidumbre que aún persiste sobre los riesgos del cambio climático? 35
- Conclusión 36

Julio 2013, Derechos Reservados

The Inter-American Network of Academies of Sciences IANAS agradece al National Research Council su apoyo y autorización para diseminar esta publicación de manera pública y gratuita y a la National Academy of Sciences por los recursos asignados para este proyecto. Publicación disponible en [www.ianas.org](http://www.ianas.org)  
Grupo de trabajo para la edición en español: IANAS (coordinación), Dr. Claudio Bifano (revisión); Suzanne D. Stephens Waller (traducción); María Areli Montes (corrección de estilo) y Daniel Moreno Alanís (diseño gráfico).

Título original en inglés "Climate Change. Evidence, Impacts and Choices" National Research Council of The National Academies. US, 2012 Derechos Reservados.



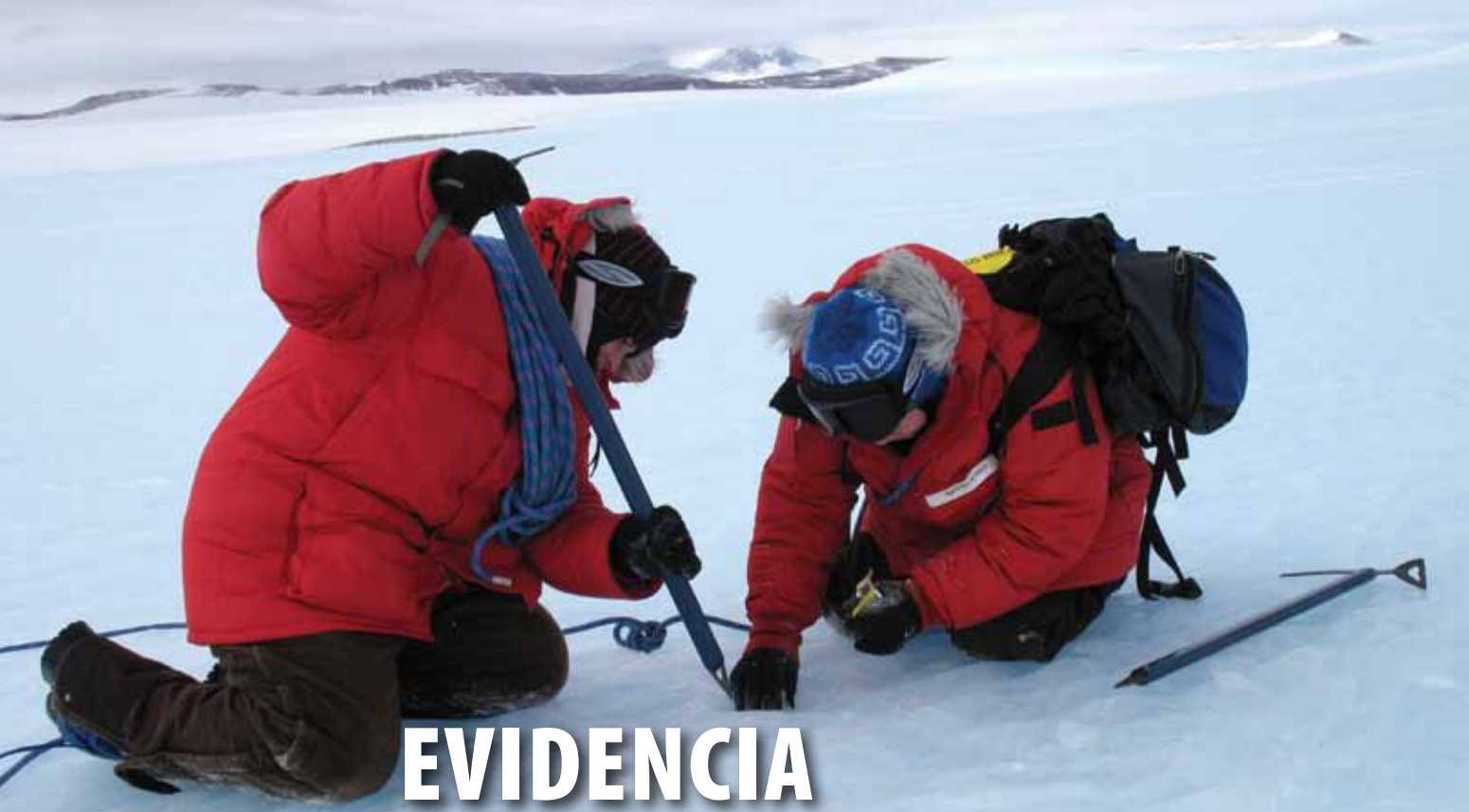
# CAMBIO CLIMÁTICO

## EVIDENCIA, IMPACTOS Y ALTERNATIVAS

¿Qué es el clima? Por lo general se considera al clima como las condiciones meteorológicas esperadas en una cierta localidad a lo largo del tiempo. Las personas saben que cuando visitan la ciudad de Nueva York durante el invierno, deben llevar consigo un abrigo. Cuando visitan la costa noroeste del Pacífico, llevarán un paraguas. El clima puede ser medido a diferentes escalas geográficas –por ejemplo, ciudades, países o el mundo entero– mediante estadísticas tales como temperaturas promedio, número promedio de días lluviosos y la frecuencia de las sequías. El *cambio* climático hace referencia a los cambios en dichas estadísticas a lo largo de años, décadas e incluso siglos.

Se han hecho enormes progresos por incrementar nuestra comprensión acerca del cambio climático y sus causas, y en consecuencia se tiene una visión mas clara de los efectos que produce en el presente y los que podrá producir en el futuro. Las investigaciones también ofrecen una mayor claridad acerca de las acciones que podrían llevarse a cabo para limitar la magnitud del cambio climático y adaptarse a sus impactos.

Este folleto tiene por finalidad ayudar a las personas a entender lo que se sabe acerca del cambio climático. En primer término, se expone la evidencia disponible sobre los efectos de la actividad humana, principalmente la quema de combustibles fósiles, como causante del calentamiento y de los cambios asociados, que están siendo observados alrededor del planeta. Seguidamente se presenta de manera resumida las proyecciones realizadas para este siglo y más allá. Por último, el folleto examina cómo la ciencia puede ayudar a la toma de decisiones acertadas para el manejo y la reducción de los riesgos planteados por el cambio climático. Para ello generalmente se utilizan informes elaborados por el Consejo Nacional de Investigación (ver la contraportada interior), que representan el consenso de expertos que han revisado cientos de estudios que describen muchos años de evidencia acumulada.



# EVIDENCIA

## del Cambio Climático Causado por el Hombre

Parte I

**L**a gran mayoría de los científicos expertos en climatología está de acuerdo en que las actividades humanas, especialmente la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas), son responsables de la mayor parte de los cambios climáticos actualmente observados.

Pero, ¿cómo se ha llegado a esta conclusión? Las ciencias meteorológicas, como toda ciencia, representan un proceso de aprendizaje colectivo que depende de la recolección cuidadosa de datos y su análisis, la formulación de hipótesis, el desarrollo de modelos para estudiar los procesos clave y llevar a cabo predicciones, así como el uso combinado de observaciones y modelos para probar la comprensión científica. El conocimiento científico se construye a lo largo del tiempo, en la medida en que se generan nuevas observaciones y datos. A medida en que las evidencias experimentales convergen en la explicación de determinados fenómenos, aumenta la confianza en el conocimiento que se genera. Desde hace más de un siglo los científicos han planteado que las emisiones resultantes de la combustión de combustibles fósiles pueden conducir a incrementos en las temperaturas promedio de la superficie de la Tierra. Décadas de investigaciones han confirmado este planteamiento y ampliado nuestra comprensión al respecto.

# ¿Cómo sabemos que la Tierra se ha calentado?

Desde 1880 muchos científicos se han dedicado a realizar mediciones de la temperatura en miles de lugares tanto en la tierra como en los océanos, utilizando un instrumental cada vez más sofisticado. Diferentes grupos de investigadores, como el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA (GISS, por sus siglas en inglés), el Centro Hadley para Cambio Climático del Reino Unido, la Agencia Meteorológica del Japón, el Centro Nacional de Datos Climáticos de la NOAA (NCDC, por sus siglas en inglés), entre otros, han hecho uso de estos datos para producir registros acerca de los cambios en la temperatura superficial del planeta a lo largo del tiempo (Figura 1). Estos grupos realizan un trabajo cuidadoso para asegurar que los datos no estén sesgados por cosas como cambios en los instrumentos de medición u otros factores que afectan las

temperaturas locales, tales como el calor adicional, producto del crecimiento.

Todos estos análisis muestran que la temperatura superficial de la Tierra se ha incrementado en más de 0.8°C (1.4°F) durante los últimos 100 años, y la mayor proporción de este incremento se dio durante los últimos 35 años. Un incremento en la temperatura de 0.8°C puede no parecer mucho si se piensa en las fluctuaciones diarias o estacionales, pero es un cambio significativo cuando se piensa en un incremento permanente promediado a través del planeta entero. Considérese, por ejemplo, que 0.8°C es mayor que las diferencias de temperatura entre Washington, DC y Charleston, Carolina del Sur, que se encuentra a más de 450 millas al sur. Considérese, también, que un decremento de tan sólo 5°C (9°F) en la temperatura mundial promedio es la diferencia entre el clima de hoy día y una era glacial.

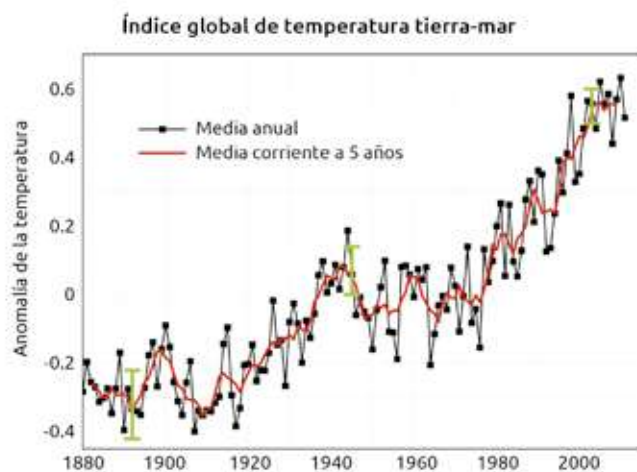


FIGURA 1

**Registro Mundial de la NASA de Temperaturas de Superficie.** Las estimaciones sobre el cambio global de temperatura de superficie, relacionado con la temperatura de superficie global promedio para el período de 1951 a 1980, alrededor de 14°C (57°F) según el Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, muestran una tendencia al calentamiento durante el siglo XX. Las estimaciones están basadas en mediciones de temperatura superficial del aire, registradas en estaciones meteorológicas, y en mediciones de la temperatura de superficie del mar, tomadas desde embarcaciones y mediante satélites. La curva en negro muestra temperaturas anuales promedio, la curva en rojo muestra una media móvil de 5 años. Las barras en verde señalan el margen de error, que ha venido disminuyendo en el tiempo. Fuente: Consejo Nacional de Investigación 2010a.



FIGURA 2

Estaciones de monitoreo climatológico marinas y terrestres, tales como las boyas ancladas del proyecto *Tropical Atmosphere Ocean* (TAO, por sus iniciales en inglés) de la NOAA, proporcionan datos en tiempo real sobre temperatura, humedad, vientos y otras variables atmosféricas. Imagen cortesía de la Oficina del Proyecto TAO, Laboratorio Ambiental Marino del Pacífico, NOAA). (Derecha) Globos meteorológicos que transportan instrumentos conocidos como radiosondas, proporcionan perfiles verticales de algunas variables equiparables en la atmósfera baja. Imagen ©University Corporation for Atmospheric Research [©Corporación Universitaria de Investigaciones Atmosféricas] (Arriba a la izquierda) La aeronave NOAA-N, lanzada en 2005, es la decimoquinta de una serie de satélites de circunnavegación polar que se remonta a 1978. Los satélites transportan instrumentos que miden la temperatura global de superficie y otras variables climáticas. Imagen cortesía de la NASA.

Además de la temperatura de la superficie, otras partes del sistema climático están siendo cuidadosamente monitoreadas (Figura 2). Por ejemplo, se emplea una variedad de instrumentos para medir la temperatura, salinidad y corrientes bajo la superficie del océano. Los globos meteorológicos se usan para sondear la temperatura, humedad y los vientos atmosféricos. Un hecho de gran importancia que se remonta a la década de los setenta, relacionado a la percepción remota vía satelital, es la posibilidad de rastrear cambios climáticos globales. Diferentes tipos de sensores colocados en decenas de satélites, han permitido construir una imagen global de los cambios de temperatura en la atmósfera y en las superficies terrestres y oceánicas. La información satelital también es empleada para estudiar desplazamientos en la precipitación y cambios en la cubierta vegetal.

Si bien los satélites miden la temperatura de manera muy distinta a los instrumentos sobre la superficie (cualquier error sería de naturaleza completamente diferente), los dos registros coinciden. También han sido observados otros indicadores del calentamiento global (ver pp. 15-17). Por ejemplo, las ondas de calor son más frecuentes, los periodos fríos son ahora más cortos y suaves, las capas de hielo y nieve se están reduciendo en el hemisferio norte, los glaciares y casquetes polares alrededor del mundo se están derritiendo, y muchas especies de plantas y animales se están desplazando a latitudes más frescas o a mayores altitudes en busca de condiciones de temperatura más adecuadas. Todo esto permite llegar a una conclusión clara y consistente: la Tierra se está calentando.

## ¿Cómo sabemos que los gases de efecto invernadero conducen al calentamiento?

Desde los albores de 1820, los científicos empezaron a apreciar la importancia de ciertos gases en la regulación de la temperatura sobre la Tierra (ver Recuadro 1). Los gases de efecto invernadero –que incluyen dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano, óxido nitroso y vapor de agua– actúan como una cubierta en la atmósfera, manteniendo atrapado el calor en la atmósfera baja. Si bien los gases de efecto invernadero representan sólo una pequeña fracción de la atmósfera de la Tierra, su presencia es crítica para mantener al planeta lo suficientemente caliente como para mantener la vida tal como la conocemos (Figura 3).

He aquí cómo opera el “efecto invernadero”. Conforme la energía del Sol llega a la Tierra, parte de ella es reflejada nuevamente hacia el espacio, pero la mayor parte es absorbida por la tierra y los océanos. Esta energía



absorbida es emitida desde la superficie de la Tierra al exterior en forma de calor. En ausencia de los gases de invernadero, este calor simplemente escaparía al espacio, y la temperatura superficial promedio del planeta descendería bajo el punto de congelación. Pero los gases de efecto invernadero absorben y redirigen parte de esta energía hacia abajo, manteniendo el calor en la cercanía de

la superficie terrestre. En la medida en que se incrementan las concentraciones de los gases con efecto invernadero, que atrapan el calor, el efecto de invernadero natural de la Tierra se ve incrementado (como si fuera una cobija más gruesa), generando un incremento en la temperatura superficial (Figura 3). La reducción de los niveles de gases invernadero en la atmósfera daría origen a un decremento en las temperaturas de la superficie.



FIGURA 3

**Amplificación del Efecto Invernadero.** El efecto invernadero es un fenómeno natural esencial para mantener el calor de la superficie de la Tierra. Como la ventana de un invernadero, los gases de efecto invernadero permiten que la luz del Sol penetre y luego impiden que el calor escape de la atmósfera. Estos gases incluyen dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y vapor de agua. Las actividades humanas –particularmente la quema de combustibles fósiles– están incrementando las concentraciones de muchos de estos gases, amplificando el efecto invernadero natural. Imagen cortesía del Museo de Ciencias Marian Koshland de la Academia Nacional de las Ciencias.

## RECUADRO 1

### Comprensión Temprana de los Gases con Efecto Invernadero.

En 1824, el físico francés Joseph Fourier (arriba) fue el primero en sugerir que la atmósfera de la Tierra podría estar actuando como un aislante de cierto tipo. Hacia 1850, el físico irlandés John Tyndall (centro) fue el primero en señalar el efecto invernadero, demostrando que el vapor de agua y otros gases atmosféricos absorben el calor radiante de la Tierra. En 1896, el científico sueco Svante Arrhenius (abajo) fue el primero en calcular el poder térmico del exceso de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A partir de sus cálculos, Arrhenius predijo que si las actividades humanas incrementaban los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, la consecuencia podría ser una tendencia hacia el calentamiento.



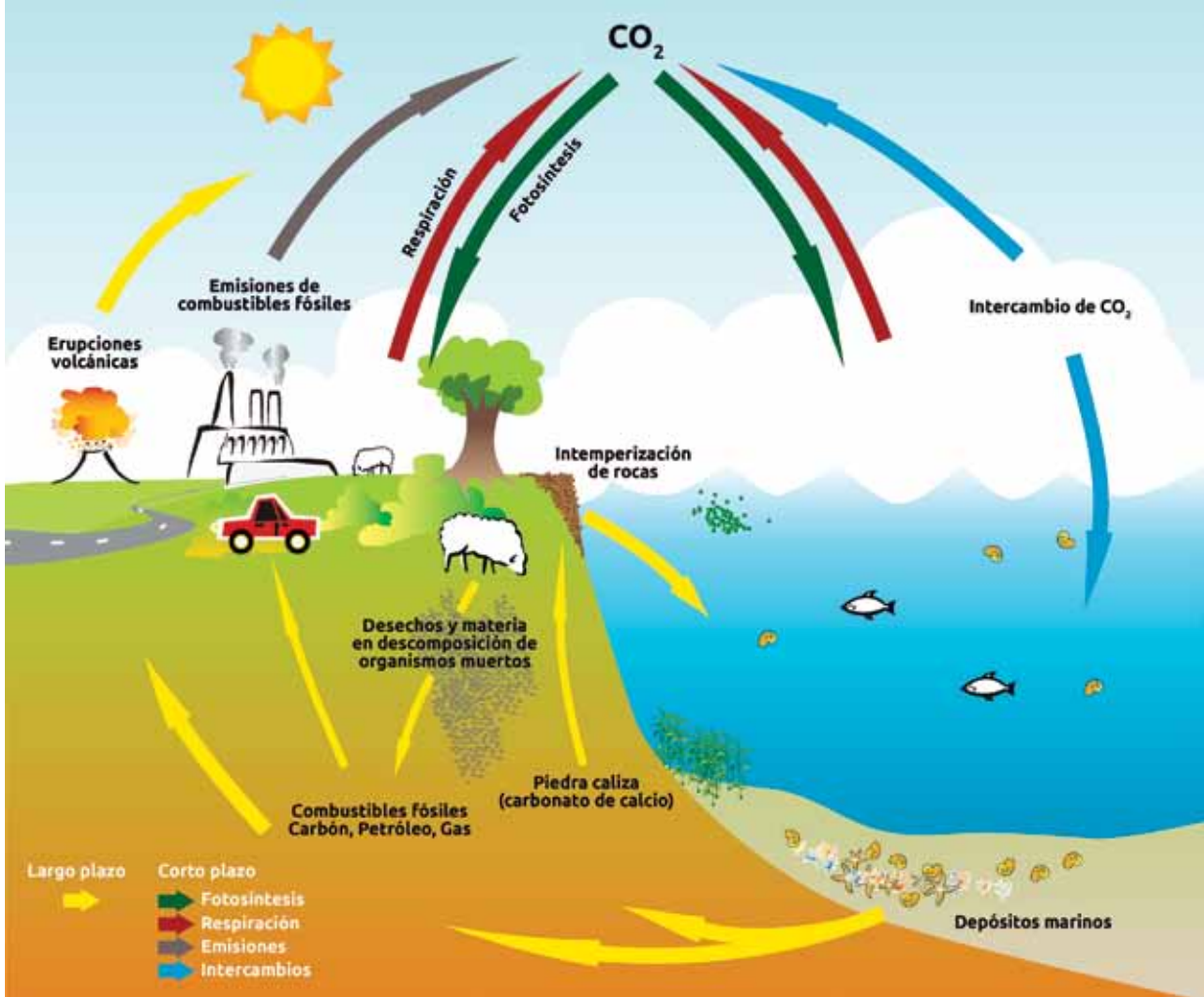


FIGURA 4

**El Ciclo del Carbono.** El carbono es intercambiado continuamente entre la atmósfera, los océanos, la biosfera y la tierra firme en una serie de escalas de tiempo. En el corto plazo, el CO<sub>2</sub> es continuamente intercambiado mediante la respiración y la fotosíntesis entre plantas, árboles, animales y el aire, y entre los océanos y la atmósfera mediante el intercambio de gases. Otras partes del ciclo del carbono, tales como la intemperización de las rocas y la formación de combustibles fósiles, constituyen procesos más lentos que se llevan a cabo a lo largo de muchos siglos. Por ejemplo, la mayoría de las reservas de petróleo del mundo se formaron a partir de los restos de plantas y animales enterrados en el sedimento de los fondos oceánicos someros hace cientos de millones de años, expuestos posteriormente a elevadas temperaturas y presiones durante muchos millones de años. Una pequeña cantidad de este carbono es liberado en forma natural cada año por los volcanes, completando así el ciclo a largo plazo del carbono. Las actividades humanas, en particular la extracción y quema de carbón, petróleo y gas natural como energía, interfieren en el ciclo natural del carbón al liberar grandes volúmenes de carbono "fósil" en periodos de tiempo relativamente cortos. Fuente: Consejo Nacional de Investigación.

## ¿Cómo sabemos que los seres humanos están causando el incremento de los gases con efecto invernadero?

**D**eterminar la influencia humana sobre las concentraciones de los gases con efecto invernadero representa un reto, ya que muchos de estos gases se presentan de forma natural en la atmósfera. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es producido y consumido en muchos procesos naturales que son parte del ciclo del carbono (ver Figura 4). Sin embargo, una vez que la humanidad comenzó a extraer formas de carbono enterradas en un

pasado remoto, como el carbón y el petróleo, quemándolos para producir energía, empezó a liberarse CO<sub>2</sub> adicional hacia la atmósfera de forma más acelerada que la liberación natural de carbono. Otras actividades humanas, como la producción de cemento y la tala y quema de los bosques (deforestación), también añaden CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Hasta la década de los años cincuenta, muchos científicos pensaban que los océanos absorberían



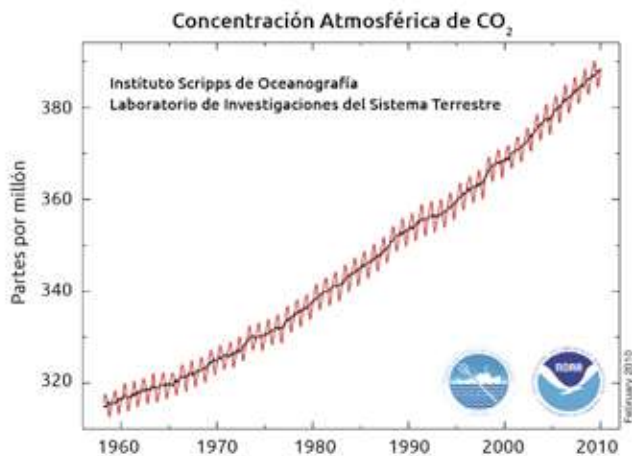


FIGURA 5

**Mediciones de Dióxido de Carbono Atmosférico.** La “curva de Keeling” representa una serie de mediciones precisas del  $\text{CO}_2$  atmosférico que Charles David Keeling empezó a recabar en 1958. Los datos muestran un incremento anual constante de  $\text{CO}_2$  más un pequeño patrón anual de sube y baja aserrado que refleja los cambios estacionales de la actividad en la vegetación (las plantas absorben  $\text{CO}_2$  durante la primavera y el verano en el hemisferio norte, que es donde se concentra la mayor proporción de la masa terrestre y los ecosistemas terrestres, y lo liberan en el otoño y el invierno). Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2010a.

la mayoría del exceso de  $\text{CO}_2$  liberado por las actividades humanas. Es entonces que una serie de publicaciones científicas examinó la dinámica del intercambio de dióxido de carbono entre el océano y la atmósfera, incluyendo una publicación del oceanógrafo Roger Revelle y Hans Seuss en 1957, y otra de Bert Bolin y Erik Eriksson en 1959. Estos trabajos condujeron a los investigadores a la hipótesis de que los océanos no podían absorber todo el  $\text{CO}_2$  que estaba siendo emitido. Para probar su hipótesis, el colega de Revelle, Charles David Keeling, empezó a recolectar muestras de aire en el Observatorio Mauna Loa de Hawai, con objeto de rastrear los cambios en las concentraciones de  $\text{CO}_2$ . Hoy día, estas mediciones están siendo llevadas a cabo en muchos lugares alrededor del mundo. Los datos revelan un constante incremento en las concentraciones del  $\text{CO}_2$  atmosférico (Figura 5).

Para determinar cómo estas concentraciones de  $\text{CO}_2$  variaban antes de las mediciones modernas, los científicos han estudiado la composición de burbujas de aire atrapadas en núcleos de hielo extraídos de Groenlandia y Antártica. Estos datos muestran que, durante al menos 2 mil años antes de la Revolución

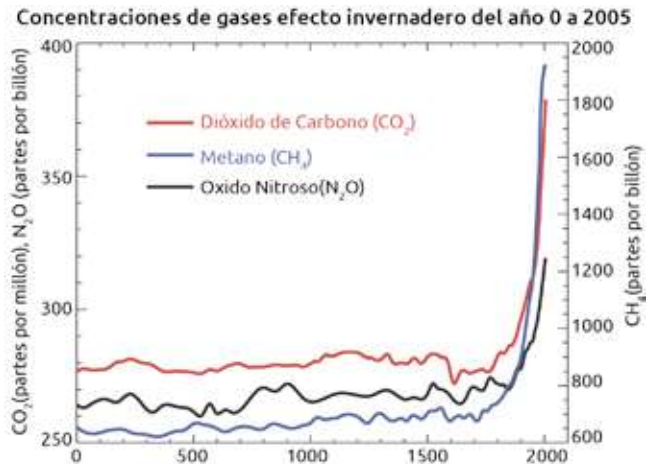


FIGURA 6

**2,000 Años de Concentración de Gases con Efecto invernadero.** Análisis de burbujas de aire atrapadas en los núcleos de hielo de la Antártida muestran que, junto con el dióxido de carbono, las concentraciones atmosféricas de metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) permanecieron relativamente constantes hasta que empezaron a incrementarse durante la era industrial. Las unidades de concentración atmosférica indican el número de moléculas del gas con efecto invernadero por millón de moléculas de aire para el dióxido de carbono y el óxido nitroso, y por miles de millones de moléculas de aire para el metano. Imagen cortesía del Programa de Investigaciones sobre Cambio Climático Global de los Estados Unidos.

Industrial, las concentraciones de  $\text{CO}_2$  atmosférico se mantuvieron constantes y luego comenzaron a incrementarse notablemente hacia los inicios de 1800 (Figura 6). Hoy, las concentraciones del  $\text{CO}_2$  atmosférico, exceden 390 partes por millón –casi 40% más elevadas que los niveles preindustriales y, conforme a los datos de los núcleos de hielo, más elevadas que en cualquier momento durante los últimos 800 mil años (ver Figura 14, p. 18).

La actividad humana también ha incrementado las concentraciones atmosféricas de otros gases importantes con efecto invernadero. El metano –producido durante la quema de combustibles fósiles, la cría de ganado, la descomposición de rellenos de basura, la producción y el transporte de gas natural, así como otras actividades–, se incrementó considerablemente a lo largo de la década de los ochenta, antes de comenzar a nivelarse en valores dos veces y media superiores que los existentes durante la era preindustrial (Figura 6). El óxido nitroso se ha incrementado aproximadamente 15% desde 1750 (Figura 6), principalmente como resultado del uso de fertilizantes, pero también de la quema de

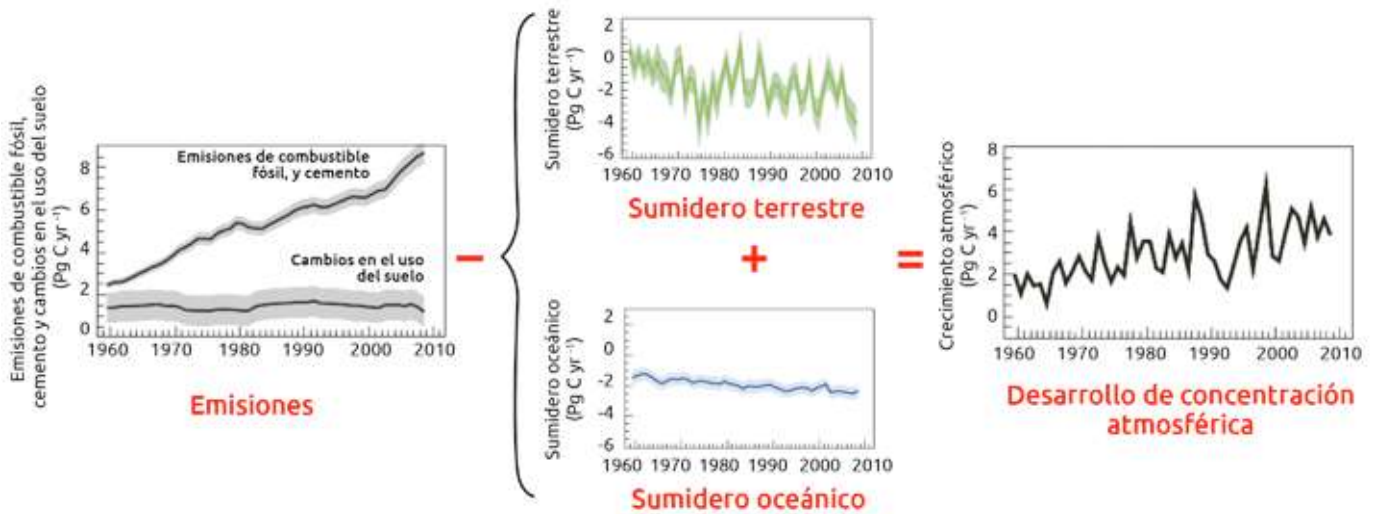


FIGURA 7

**Las Emisiones Exceden la Absorción Natural de CO<sub>2</sub>.** Las emisiones de CO<sub>2</sub> debidas a la combustión de combustibles fósiles y la manufactura de cemento se están incrementando, mientras que la capacidad de los “sumideros” de carbono que lo absorben –por ejemplo, la vegetación terrestre y marina– se están reduciendo. El CO<sub>2</sub> atmosférico se está incrementando como resultado de ello. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011a

combustibles fósiles y ciertos procesos industriales. Algunos químicos industriales, como los clorofluorocarbonos (CFC), actúan como un potente gas de efecto invernadero y tienen un largo ciclo de vida en la atmósfera. Ya que los CFC no tienen fuentes de origen natural, su incremento puede ser atribuido, sin lugar a dudas, a las actividades humanas.

Además de las mediciones directas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, los científicos han acumulado registros detallados acerca de las cantidades de carbón, petróleo y gas natural consumidas cada año y también han estimado cuánto CO<sub>2</sub> está siendo absorbido, en promedio, por la superficie terrestre y los océanos. Estos análisis muestran que cerca

de 45% del CO<sub>2</sub> emitido por la actividad humana permanece en la atmósfera. Al igual que en una tina desborda el agua si entra más de la que puede salir, la producción humana de CO<sub>2</sub> sobrepasa la capacidad natural de la Tierra de eliminarlo de la atmósfera. Como resultado, los niveles atmosféricos de CO<sub>2</sub> se están incrementando (ver Figura 7) y permanecerán elevados por muchos siglos. Es más, un análisis de tipo forense sobre CO<sub>2</sub> en la atmósfera revela la “huella digital” de un carbono derivado de combustibles fósiles (ver Recuadro 2). Esta evidencia prueba de manera concluyente que las concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera son resultado de la actividad humana.

## RECUADRO 2

**Pistas de la “Huella Digital” del Dióxido de Carbono.** En un proceso que se lleva a cabo durante millones de años, el carbono producto de la descomposición de plantas y animales se almacena en las profundidades de la corteza terrestre en forma de carbón, petróleo y gas natural (ver Figura 4). Dado que este carbono “fósil” es tan antiguo, contiene una proporción muy baja del radioisótopo Carbono-14 –una forma de carbono que decae de manera natural durante largos periodos de tiempo. Cuando los científicos miden los niveles de Carbono-14 en la atmósfera, encuentran que son mucho menores que los niveles presentes en los ecosistemas vivos, indicando así que hay una abundancia de carbono “viejo”. Si bien una pequeña fracción de este carbono viejo puede atribuirse a las erupciones volcánicas, la mayor cantidad proviene de la quema de combustibles fósiles. Las emisiones promedio de CO<sub>2</sub> de origen volcánico representan alrededor de 200 millones de toneladas, mientras que los seres humanos están emitiendo un estimado de 36 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> cada año, de las cuales entre 80-85% proviene de los combustibles fósiles.

# ¿Qué tanto están calentando las actividades humanas a la Tierra?

Los gases con efecto invernadero son considerados como “agentes forzantes” dada su capacidad de modificar el equilibrio radiante del planeta. Un agente “forzante” puede actuar aumentando o disminuyendo la temperatura de la Tierra. Los gases con efecto invernadero tienen, cada uno, una diferente capacidad de forzamiento radiante. Por ejemplo, una simple molécula de metano tiene cerca de 25 veces el poder calórico de una sola molécula de  $\text{CO}_2$ . Sin embargo, el  $\text{CO}_2$  tiene un efecto de calentamiento general más elevado que el metano, ya que es mucho más abundante y permanece en la atmósfera durante periodos de tiempo más prolongados. Los científicos pueden calcular el poder de forzamiento calórico de los gases con efecto invernadero basándose en los cambios de sus concentraciones en el tiempo, o mediante cálculos físicos sobre la manera en que éstos transfieren la energía a través de la atmósfera.

Algunos agentes forzantes desplazan el equilibrio calórico de la Tierra hacia el enfriamiento, compensando parte del calentamiento asociado con gases de efecto invernadero. Por ejemplo, algunos aerosoles –que son partículas líquidas o sólidas suspendidas en la atmósfera, como las que constituyen la mayor parte de la contaminación

visible en el aire– tienen un efecto refrigerante, ya que reflejan una porción de la radiación solar lumínica de regreso al espacio (ver Recuadro 3).

La actividad humana, en particular la combustión de combustibles fósiles, ha incrementado el número de partículas de aerosol en la atmósfera, especialmente sobre y alrededor de los centros urbanos e industriales.

Cambios en los usos del suelo y de la cubierta del terreno representan otra forma mediante la cual las actividades humanas están influyendo en el clima de la Tierra. La

deforestación es responsable de 10 a 20% del exceso de  $\text{CO}_2$  emitido a la atmósfera cada año y, como ya se mencionó, las prácticas agrícolas aportan óxido nitroso y metano. Los cambios en los usos del suelo y la cubierta del terreno también modifican la reflectividad<sup>1</sup> de la superficie terrestre; mientras más reflectiva es una superficie, más luz solar es irradiada de regreso al espacio. Los campos de cultivo son, por lo general, más reflectivos que un bosque no perturbado, mientras que las áreas urbanas frecuentemente reflejan menos energía que los terrenos no perturbados. A nivel global, se estima que los cambios en los usos del suelo de origen antrópico tienen un ligero efecto refrigerante.



<sup>1</sup> Es la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie.  
Nota del traductor (N.T.)

## RECUADRO 3

**Efectos Calentadores y Enfriadores de los Aerosoles.** Los aerosoles son pequeñas partículas líquidas o sólidas suspendidas en la atmósfera que provienen de una cantidad de actividades humanas, como la combustión de combustibles fósiles, así como de procesos naturales, como las tormentas de polvo, erupciones volcánicas y emisiones de rocío salino procedente del mar. La mayor proporción de la contaminación visible en el aire está compuesta de aerosoles. La mayoría de los aerosoles tiene un efecto refrigerante, ya que dispersan una porción de la energía solar entrante de regreso al espacio, si bien algunas partículas, como el polvo y el hollín, de hecho absorben parte de la energía solar y actúan como agentes del calentamiento. Muchos aerosoles también incrementan la reflexión de la luz solar de regreso al espacio al hacer más brillantes a las nubes, lo que genera un enfriamiento adicional. Muchas naciones, estados y comunidades han iniciado acciones para reducir la concentración de ciertos contaminantes aéreos, como los aerosoles de sulfatos, responsables de la lluvia ácida. A diferencia de la mayoría de los gases con efecto invernadero desprendidos por la actividad humana, los aerosoles sólo permanecen en la atmósfera durante cortos periodos de tiempo; por lo general, un par de semanas.

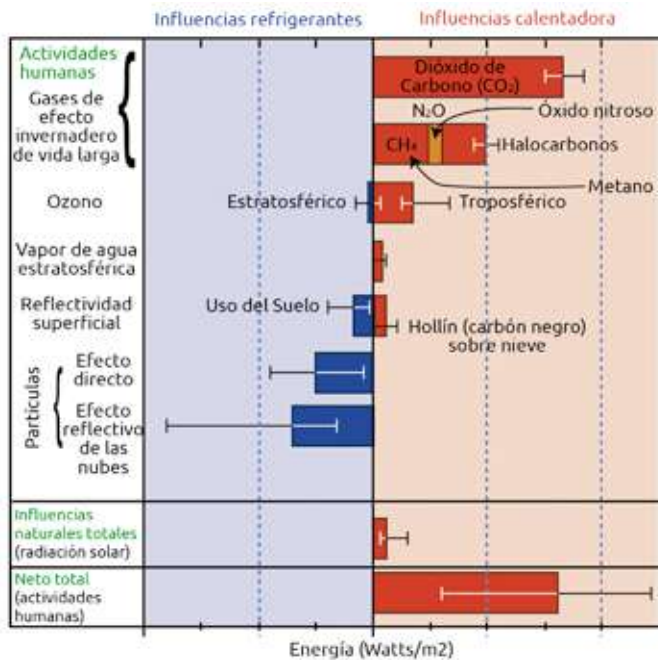


FIGURA 8

**Influencias sobre el Calentamiento y el Enfriamiento de la Tierra.**

Desde 1750 se han venido calculando las influencias en el calentamiento y enfriamiento (medidas en watts por metro cuadrado) de diferentes agentes forzantes del clima, provenientes de fuentes humanas y naturales generadas durante la Era Industrial (alrededor de 1750). Los agentes forzantes del clima de origen antrópico incluyen incrementos de los gases con efecto invernadero y aerosoles, así como cambios en los usos del suelo. Grandes erupciones volcánicas producen un efecto refrigerante temporal, pero el Sol es el único factor principal con un efecto a largo plazo en el clima. El efecto neto de las actividades humanas tiene una influencia notable en el calentamiento de más de 1.6 watts por metro cuadrado. Fuente: Consejo Nacional de la Investigación, 2010a (representación por cortesía del Programa de los Estados Unidos sobre Investigaciones Climáticas Globales)



FIGURA 9

Cuando se analizan en su conjunto todos los agentes forzantes naturales y antrópicos, los científicos estiman que el forzamiento calórico neto entre 1750 y 2005 está conduciendo a la Tierra hacia el calentamiento (Figura 8). La energía adicional representa cerca de 1.6 watts por metro cuadrado de la superficie de la Tierra. Si se multiplica por esa extensión, esta energía representa más de 800 billones (millones de millones) de watts (terawatts) –anualmente, esto representa alrededor de ¡50 veces la cantidad de energía producida en su conjunto por todas las plantas generadoras de energía del planeta! Esta energía extra está siendo añadida al sistema climático de la Tierra cada segundo de cada día.

El calentamiento que se produce como respuesta al forzamiento calórico esta determinada por un conjunto de sistemas o circuitos de retroalimentación que amplifican o amortiguan el nivel de calentamiento original. Por ejemplo, conforme se calienta la Tierra, los hielos y nieve polares se derriten, permitiendo que las tierras y océanos descubiertos, de colores más oscuros, absorban más calor –haciendo que la Tierra se caliente aún más–, lo que a la vez genera un mayor deshielo y derretimiento, y así sucesivamente (ver Figura 9). Otro circuito de retroalimentación involucra al vapor de agua. La cantidad de vapor de agua en la atmósfera se incrementa en la medida en que la superficie del océano y la atmósfera baja se calientan; un incremento de 1°C (1.8°F) aumenta el vapor de agua cerca de 7%. Ya que el vapor de agua también es un gas con efecto invernadero, este incremento causa un calentamiento adicional. Los procesos de retroalimentación que fortalecen el forzamiento calórico inicial se conocen en la comunidad científica como circuitos de retroalimentación positiva o amplificadores.

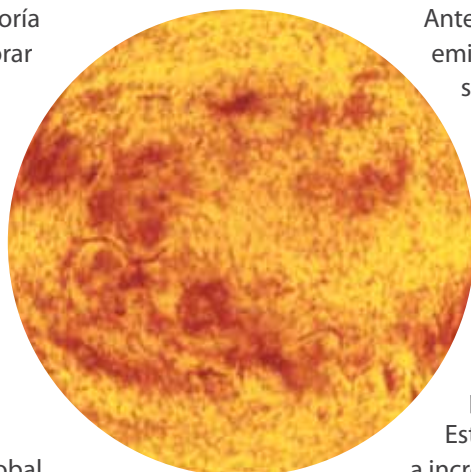
**Circuitos de Retroalimentación Climática.** La cantidad de calentamiento que se produce debido al incremento en las emisiones de gases efecto invernadero depende en parte de circuitos de retroalimentación. Los circuitos de retroalimentación positiva (amplificadores) incrementan los cambios de temperatura neta de algún forzamiento, mientras que las retroalimentaciones negativas amortiguan en parte el cambio de temperatura asociado con el forzamiento climático. El derretimiento de los hielos marinos en el Ártico es ejemplo de un circuito de retroalimentación positivo. Conforme se funde el hielo, menos luz solar es reflejada de regreso al espacio y más es absorbida por los océanos, más oscuros, causando un calentamiento adicional y un mayor deshielo. Fuente: Consejo Nacional de Investigaciones, 2011d

El calentamiento inducido por un forzamiento climático presenta un desfase inherente. Este desplazamiento se presenta porque a las diferentes partes del sistema climático de la Tierra les lleva un cierto tiempo calentarse o enfriarse –especialmente a

los extensos océanos. Aunque fuera posible mantener a todos los agentes forzadores producto del ser humano en los valores actuales, la Tierra continuaría calentándose más allá de los 1.4°F que ya están siendo observados con las emisiones producidas a la fecha.

## ¿Cómo sabemos que la actual tendencia al calentamiento no es causada por el Sol?

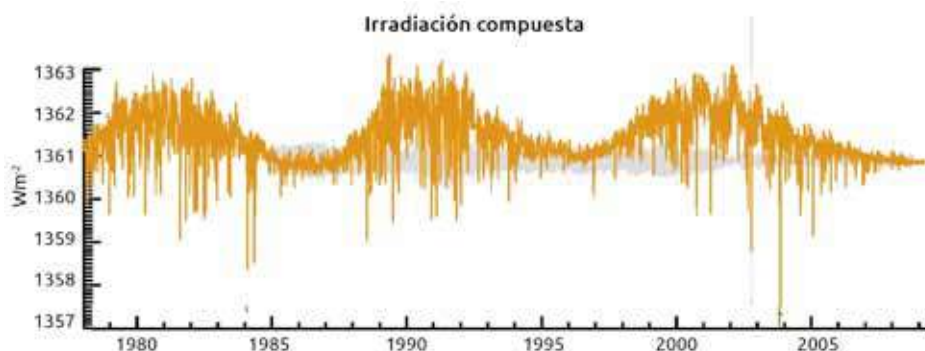
Otra forma de probar una teoría científica consiste en explorar diferentes explicaciones. Dado que las emisiones solares tienen una fuerte influencia sobre la Tierra, los científicos han examinado los registros disponibles sobre la actividad solar para determinar si las modificaciones en las emisiones de energía solar pueden ser responsables de las tendencias al calentamiento global observadas. La mayoría de las mediciones directas de emisiones solares está representada por registros satelitales, disponibles desde 1979. Estos registros muestran que las emisiones solares no han presentado un incremento neto durante los pasados 30 años (Figura 10) y, por lo tanto, no pueden ser responsables del calentamiento durante este periodo.



Antes de la era de los satélites, las emisiones de energía solar tenían que ser estimadas mediante métodos más indirectos, tales como el registro del número de manchas solares observadas anualmente, ya que éstas constituyen un indicador de la actividad solar. Estos métodos indirectos sugieren un ligero incremento en la energía solar que impactó a la Tierra durante las primeras dos décadas del siglo XX.

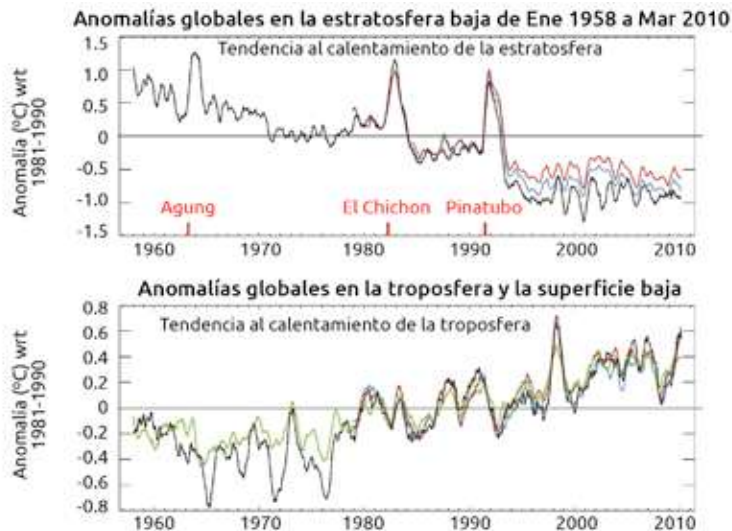
Este aumento pudo haber contribuido a incrementos globales de temperatura durante ese lapso, pero no explican el calentamiento hacia finales del siglo.

Una evidencia adicional de que el calentamiento global no es producto de los cambios solares puede ser encontrada en las tendencias de temperatura en las diferentes capas de la atmósfera. Esta información proviene de dos fuentes: los globos aerostáticos liberados dos veces al día desde cientos



**Mediciones de la Energía Solar.** Mediciones satelitales de la energía radiante que incide sobre la Tierra, disponibles desde 1979, muestran que no hay un incremento neto en el forzamiento solar durante los pasados 30 años. Muestran tan sólo pequeñas variaciones periódicas asociadas con el ciclo solar de 11 años. Fuente: Consejo Nacional de la Investigación, 2010a.

FIGURA 10



**Patrones de Calentamiento en las Capas de la Atmósfera.** Datos procedentes de globos meteorológicos y satélites muestran una tendencia al calentamiento en la troposfera, la capa inferior de la atmósfera, que se extiende unas 10 millas hacia arriba (gráfica inferior) y una tendencia al enfriamiento en la estratosfera, la capa inmediata superior de la troposfera (gráfica superior). Éste es exactamente el patrón esperado de un incremento en los gases de efecto invernadero, que atrapan la energía más cerca de la superficie de la Tierra. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2010a

FIGURA 11

de lugares alrededor del mundo a partir de finales de los cincuenta, y los satélites, que han hecho un seguimiento constante de la temperatura en diferentes capas de la atmósfera desde finales de los setenta. Ambos conjuntos de datos han sido objeto de un escrutinio cuidadoso y demuestran una tendencia al calentamiento en la parte baja de la atmósfera (la troposfera) y hacia el enfriamiento en su parte superior (la estratosfera). Éste es justamente

el patrón de distribución vertical esperado en cambios de temperatura debidos a un incremento de los gases con efecto invernadero, mismos que atrapan la energía más cerca de la superficie de la Tierra. Si un incremento en las emisiones solares fuera responsable de las recientes tendencias al calentamiento, el patrón vertical de calentamiento sería más uniforme a través de las distintas capas de la atmósfera.

## ¿Cómo sabemos que la actual tendencia al calentamiento no es causada por ciclos naturales?

Las variaciones naturales de la temperatura precipitaciones y otras variables complican la detección de las tendencias climáticas. Estas variaciones naturales son causadas por múltiples procesos diferentes que pueden desarrollarse a lo largo de un rango amplio de escalas temporales –desde un verano particularmente caluroso o un invierno nevado, hasta cambios que se presentan a lo largo de millones de años.

Entre las variaciones climáticas mejor conocidas de corto plazo se encuentran El Niño y La Niña, que representan periodos de calentamiento y enfriamiento naturales en el Pacífico tropical. Estos eventos se asocian con importantes cambios interanuales de patrones de temperatura y precipitaciones pluviales en muchas partes del

mundo y han sido responsables de una serie de eventos climáticos extremos, tales como las inundaciones de 1992 en los estados de la mitad oeste de los Estados Unidos, así como sequías severas en los estados del sureste en 2006 y 2007. A nivel global, las temperaturas tienden a ser más elevadas durante los periodos de El Niño, como ocurrió en 1998, y más bajas durante los años de La Niña, como lo fue en 2008. Sin embargo estas fluctuaciones de temperatura son menores que las observadas en la tendencia al calentamiento registrada en el siglo XX, exceptuando el 2008 que fue un año bastante caluroso según los registros de largo plazo.

Las variaciones climáticas naturales también pueden ser consecuencia de lentos cambios en la órbita de la Tierra alrededor del Sol, que afectan la

energía que recibe la Tierra, como es el caso del ciclo de glaciaciones (ver pp. 18-19), o con cambios de corto plazo en la cantidad de aerosoles de origen volcánico en la atmósfera. Erupciones mayores, como la del Monte Pinatubo en 1991, emitieron enormes cantidades de partículas hacia la estratosfera, mismas que enfriaron la Tierra. Sin embargo, las temperaturas de la superficie por lo general regresan a su estado original en un lapso de 2-5 años, a medida que las partículas abandonan la atmósfera. Los efectos de enfriamiento en el corto plazo de varias erupciones volcánicas simultáneas pueden ser apreciados en los registros de temperaturas del siglo XX, y otro tanto ocurre con las variaciones globales de temperatura asociadas con varios eventos severos de El Niño y La Niña, a pesar de lo cual sigue siendo evidente una tendencia al calentamiento (Figura 12).

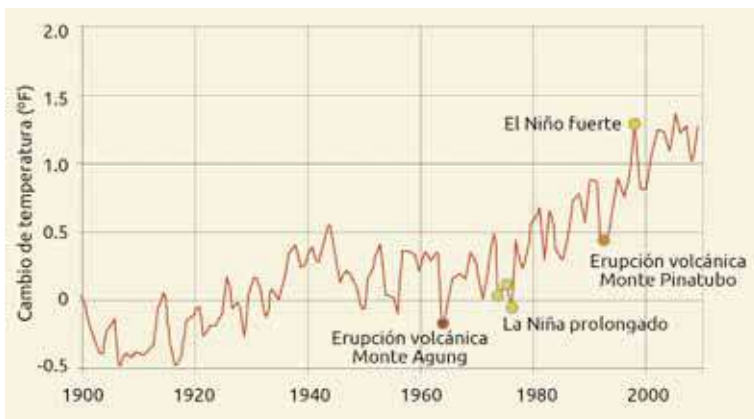


FIGURA 12

**Efectos de Corto Plazo de la Temperatura sobre las Variaciones Naturales del Clima.** Factores naturales, tales como las erupciones volcánicas y los eventos de El Niño y La Niña, pueden originar variaciones interanuales en las temperaturas globales promedio, pero no pueden explicar la tendencia al calentamiento observada durante los 60 años pasados. Imagen cortesía del Museo de las Ciencias Marian Koshland.

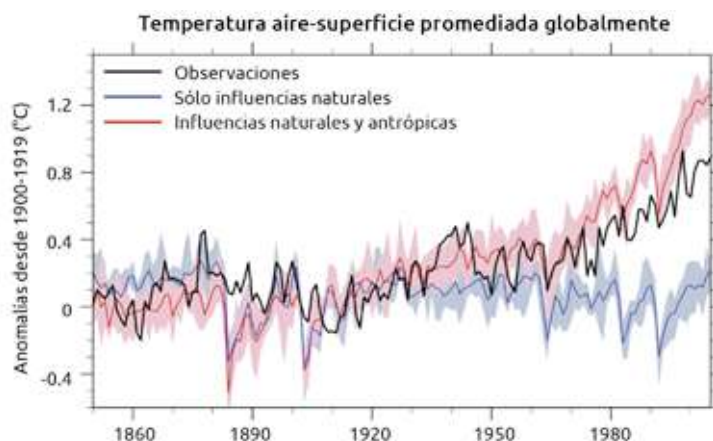


FIGURA 13

**Corridas Modelo con y sin Influencia Humana.** Modelos de simulación de las temperaturas de superficie del siglo XX se aproximan más a las temperaturas observadas cuando se incluyen tanto las influencias naturales como humanas en dichas simulaciones. La línea en negro muestra un estimado de los cambios observados en las temperaturas de superficie. La línea en azul muestra los resultados de modelos que sólo incluyen forzamientos naturales (actividad solar y volcanes). Las regiones sombreadas en rojo muestran los resultados de modelos que incluyen forzamientos tanto de origen natural como humano. Fuente: Meehl *et al.*, 2011]



#### RECUADRO 4

**¿Qué son los modelos climáticos?** Durante varias décadas, los científicos han hecho uso de los sistemas de cómputo más avanzados para simular el clima de la Tierra. Estos modelos están basados en una serie de ecuaciones matemáticas que representan las leyes básicas de la Física –leyes que gobiernan el comportamiento de la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre y otras partes del sistema climático, así como las interacciones entre las diferentes partes del sistema. Los modelos climáticos representan herramientas importantes para entender el pasado, presente y futuro cambio climático. Los modelos climáticos son probados en relación con las observaciones realizadas para determinar si los modelos simulan correctamente lo que de hecho ocurrió en un pasado distante o reciente. Imagen cortesía del Museo de las Ciencias Marian Koshland.

Para poner en perspectiva los eventos de El Niño y La Niña, así como otras fluctuaciones naturales de corto plazo, los científicos meteorólogos analizan tendencias a lo largo de varias décadas, o aun mayores, al momento de determinar la influencia humana sobre el sistema climático. Teniendo en cuenta los registros de temperatura disponibles de forzamiento climático y de las fuentes de variabilidad climática natural, los científicos han llegado a la conclusión de que existe más del 90% de probabilidad de que la tendencia al calentamiento global observada durante los pasados 50 a 60 años puede ser atribuida a emisiones provenientes de la combustión de combustibles fósiles y otras actividades humanas. Estas afirmaciones que atribuyen el cambio climático a las actividades humanas, también se basan en información

proveniente de modelos climáticos (ver Recuadro 4). Los científicos han usado estos modelos para simular lo que habría sucedido si los humanos no hubieran modificado el clima durante el siglo XX, es decir, cómo habrían evolucionado las temperaturas globales si sólo factores naturales (volcanes, el Sol, así como la variabilidad climática interna) estuvieran influyendo en el sistema climático. Estas simulaciones para una “Tierra no perturbada” predicen que, en ausencia de las actividades humanas, se habría dado un calentamiento despreciable o, más aún, un ligero enfriamiento durante el siglo XX. Sin embargo, cuando se incorporan en los modelos las emisiones de gases con efecto invernadero y otras actividades, los cambios resultantes en las temperaturas de superficie se asemejan cercanamente a los cambios observados (Figura 13).



## ¿Qué otros cambios climáticos e impactos han sido ya observados?

**E**l aumento en temperaturas debido al incremento en las concentraciones de los gases con efecto invernadero ha producido patrones distintivos de calentamiento sobre la superficie de la Tierra, que se refleja en temperaturas más elevadas en la mayor parte de la superficie terrestre y en el Ártico. También se presentan diferencias estacionales significativas en el calentamiento observado. Por ejemplo, la segunda mitad del siglo XX evidenció un intenso calentamiento invernal sobre porciones de Canadá, Alaska, así como el norte de Europa y Asia, mientras que el calentamiento vernal fue particularmente intenso a lo largo del Mediterráneo, el Oriente Medio y en algunos otros lugares, incluyendo partes del oeste de los Estados Unidos (Figura 15). Las ondas de calor y registros de temperaturas récord han aumentado en la mayoría de las regiones del mundo, mientras que los frentes fríos y registros récord de temperaturas bajas han disminuido.

El calentamiento global también está teniendo un efecto significativo sobre los hielos y la nieve, particularmente como respuesta al fuerte calentamiento en el Ártico. Por ejemplo, la extensión anual promedio de la capa de hielo ártico ha disminuido alrededor de 10% por década desde que

se dio inicio al monitoreo satelital en 1978 (Figura 16). Este derretimiento ha sido particularmente significativo hacia finales del verano, dejando grandes extensiones del Océano Ártico libres de hielo durante semanas, lo cual ha despertado preocupación acerca de los efectos que esto puede tener sobre los ecosistemas, las rutas navieras comerciales, la exploración de gas y petróleo, así como la defensa nacional. Muchos de los glaciares del mundo y capas de hielo se están derritiendo en repuesta a esta tendencia al calentamiento, y tanto el manto de nieve como la caída invernal anual promedio de nieve en el largo plazo se han reducido en muchas regiones, tales como la cadena montañosa de la Sierra Nevada en el oeste de los Estados Unidos.

Gran parte del exceso de calor causado por las emisiones de gases con efecto invernadero de origen antrópico ha calentado los océanos del mundo durante las décadas pasadas. El agua se expande al calentarse, lo que conlleva a una elevación del nivel del mar. El agua proveniente de glaciares, capas y mantos de hielo que se derriten, también contribuye al incremento en el nivel del mar. Mediciones realizadas mediante mareógrafos y complementadas por satélites muestran que desde 1870 los niveles

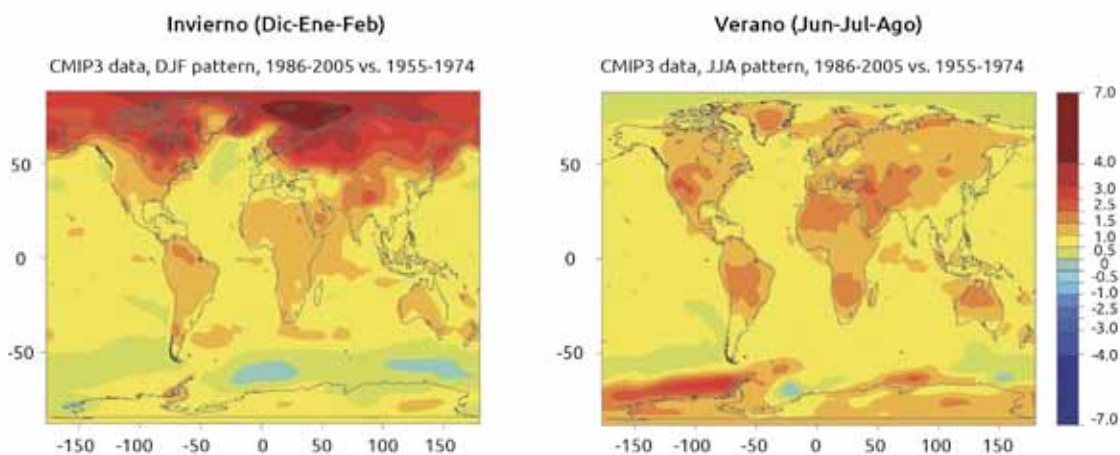


FIGURA 15

**Patrones de Calentamiento en Invierno y Verano.** Registros de temperaturas promedio de 20 años de 1986-2005, comparados con los de 1955-1974, muestran un patrón distintivo de calentamiento invernal y vernal. El calentamiento invernal ha sido intenso en partes del Canadá, Alaska, el norte de Europa y Asia. Los veranos se han calentado a lo largo del Mediterráneo y en el Oriente Medio, así como otros lugares, incluyendo porciones del oeste de los Estados Unidos. Las proyecciones para el siglo XXI muestran un patrón similar. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011a.

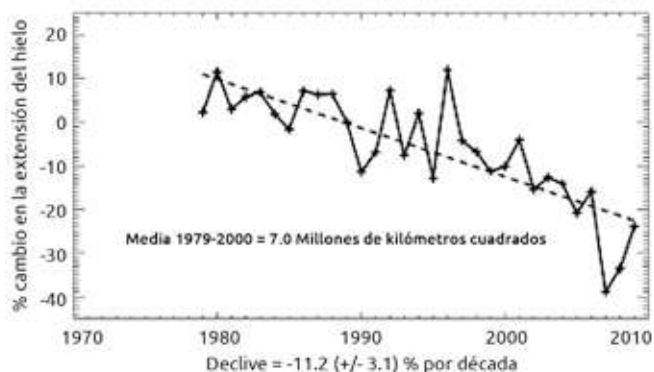


FIGURA 16

**Pérdida de los Hielos Marinos en el Ártico.** Mediciones realizadas por satélite muestran un constante decremento en la extensión de los hielos árticos marinos hacia fines de septiembre (finales del verano) de 1979 a 2009 (expresado como una diferencia porcentual de 1979-2009 en la extensión promedio de hielo marino, que cubría 7.0 millones de millas cuadradas). Los datos muestran una variación interanual considerable, pero se aprecia claramente una reducción en el largo plazo de los hielos marinos de más de 10% por década, como lo muestra la línea punteada en la figura. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2010a.

mundiales promedio de los océanos han aumentado en cerca de 8 pulgadas (0.2 metros). Se estima que cerca de un tercio del incremento total en el nivel del mar durante las pasadas cuatro décadas puede ser atribuido a la expansión de los océanos; la mayor proporción del remanente sería proveniente del derretimiento de los hielos (Figura 17).

Por otra parte, dado que el  $\text{CO}_2$  reacciona con el agua de mar para formar ácido carbónico, la acidificación de los océanos del mundo es otra muestra clara de la elevación de las concentraciones de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera (Figura 18). Se estima que los océanos han absorbido entre un cuarto a un tercio del exceso de  $\text{CO}_2$  procedente de las actividades humanas, aumentando su acidez en un 30% con respecto a la era preindustrial. En términos geológicos, este gran cambio se ha llevado a cabo en un periodo de tiempo muy corto, y la evidencia indica que tiene el potencial de modificar radicalmente los ecosistemas marinos, así como la salud de los arrecifes de coral, los crustáceos y las pesquerías.

Otro ejemplo de cambio climático observado durante las pasadas décadas son los cambios en la frecuencia y distribución de las precipitaciones pluviales. La precipitación total en los Estados Unidos se ha incrementado en cerca de 5% durante los 50

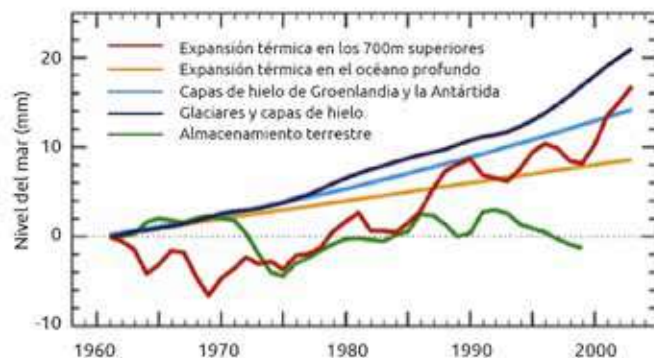


FIGURA 17

**Contribuyentes al Incremento en el Nivel del Mar.** El nivel del mar se ha incrementado constantemente durante las pasadas décadas debido a diversos contribuyentes: una expansión térmica en los 700m más superficiales del océano (en rojo), y las capas oceánicas más profundas (en anaranjado), las aguas de deshielo de las capas de hielo de la Antártida y Groenlandia (en azul), el agua de deshielo de glaciares y capas de hielo (en morado), y el almacenamiento de agua en la tierra (en verde). Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011a.

años pasados, aunque no lo ha hecho de manera geográficamente uniforme. Las condiciones suelen ser más húmedas en el noreste del país, más secas en el sureste y mucho más áridas en el suroeste.

El aire caliente absorbe más vapor de agua, lo que conlleva a un incremento perceptible en la intensidad de las precipitaciones. En los Estados Unidos la fracción

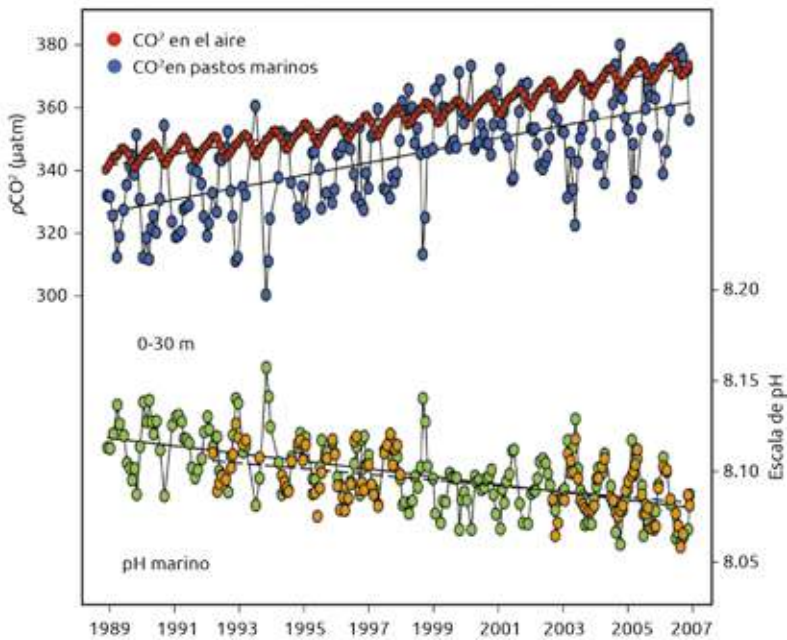


FIGURA 18

### Evidencia de la Acidificación de los Océanos.

Conforme se incrementa la concentración del exceso de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, los científicos deseaban saber si también se estaba acumulando en los océanos. Los estudios iniciados a mediados de los ochenta muestran que la concentración de  $\text{CO}_2$  en las aguas oceánicas (en azul, calculadas de la presión parcial de  $\text{CO}_2$  en agua de mar), se ha incrementado paralelamente al incremento de  $\text{CO}_2$  atmosférico (en rojo, parte de la curva de Keeling). Al mismo tiempo, el océano se ha vuelto más ácido, ya que el  $\text{CO}_2$  reacciona con el agua de mar para formar ácido carbónico. Los puntos anaranjados representan mediciones de pH directas en el agua marina de superficie (un pH menor es más ácido), y los puntos verdes han sido calculados con base en las propiedades químicas del agua de mar. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2010d.

El cambio climático ha incrementado las poblaciones de plagas forestales en el oeste de los Estados Unidos. Los árboles rojos en esta imagen de la Represa de Dillon en Colorado han muerto de una infestación del escarabajo del pino de montaña (*Dendroctonus ponderosae*).



de precipitación total que cae durante el 1% de las lluvias más intensas, se ha incrementado en cerca de 20% durante el siglo pasado y ha sido en los estados del noreste donde se ha experimentado un incremento del 54% de las lluvias. Estos cambios aumentan los riesgos de inundación y genera problemas adicionales sobre los sistemas de manejo de aguas negras y de desalojo de excesos de agua por tormentas.

Conforme se ha modificado el clima, muchas especies han desplazado sus áreas de distribución hacia los polos o elevaciones mayores, buscando permanecer en áreas con las mismas temperaturas ambientales del lugar de origen. La periodicidad de diferentes actividades estacionales también está siendo modificada. Muchas especies de plantas están floreciendo más temprano en la primavera, algunas aves, mamíferos, peces e insectos están emigrando más pronto, mientras que otras especies están modificando sus patrones estacionales de reproducción. Análisis globales muestran que este tipo de comportamientos se está presentando en promedio 5 días antes por cada década en el lapso de 1970 y 2000. Este tipo de cambios pueden interferir en patrones de alimentación, polinización y otras interacciones fundamentales entre las

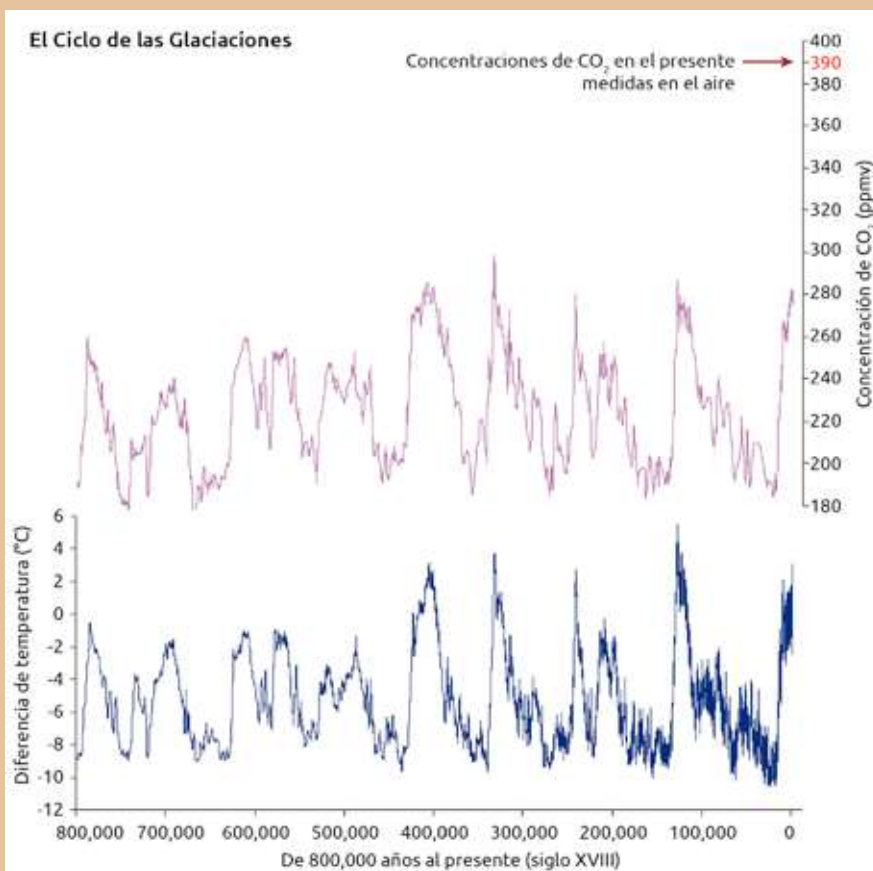
especies, afectando también la temporalidad e intensidad en la presencia de insectos, el surgimiento de enfermedades y otras perturbaciones. En el oeste de los Estados Unidos, el cambio climático ha incrementado la población de plagas forestales, tales como el escarabajo de los pinos.

La siguiente sección describe cómo se prevé que prosigan las tendencias observadas de cambio climático y sus impactos, siempre que las emisiones antrópicas de los gases con efecto invernadero continúen durante el próximo siglo y más allá.

# LAS GLACIACIONES

Tal vez el ejemplo más dramático de variabilidad climática de largo plazo es el ciclo de las glaciaciones. Análisis detallados de sedimentos oceánicos a grandes profundidades, núcleos de hielo y otros datos, muestran que durante al menos 800 mil años, y probablemente durante los pasados 4 a 5 millones de años, la Tierra ha pasado a través de períodos prolongados durante los cuales las temperaturas fueron mucho más bajas que en el presente, y gruesas capas de hielo cubrieron grandes extensiones del hemisferio norte. Estos prolongados y gélidos intervalos solían durar alrededor de 100 mil años, siendo interrumpidos por períodos interglaciares más cortos, como los representan los últimos 10 mil años (Figura 14).

Haciendo uso de conocimientos teóricos, observaciones y modelado, los científicos han deducido que las eras glaciares son causadas por una ligera variación recurrente en la órbita de la Tierra, que alteran la cantidad y distribución estacional de la energía solar que llega al hemisferio norte. Estos cambios relativamente pequeños de la energía solar se ven reforzados durante miles de años mediante cambios graduales en la cubierta glacial de la Tierra (la criosfera) y en los ecosistemas (biosfera), que



## 800,000 Años de Registros de Temperatura y Dióxido de Carbono.

Como lo muestran los registros de núcleos de hielo tomados en Vostok Antártida, la temperatura cerca del Polo Sur ha variado en hasta 20°F (11°C) durante los pasados 800 mil años. Los patrones cíclicos de variación en temperatura representan los ciclos de glaciaciones/ períodos interglaciares. Durante estos ciclos, cambios en las concentraciones de dióxido de carbono (en rojo) se ajustan bien con los cambios de temperatura (en azul); el CO<sub>2</sub> va persiguiendo los cambios en temperatura. Ya que la nieve se tarda un cierto tiempo en comprimirse en hielo, para la mayoría de las localidades no hay datos disponibles de núcleos de hielo mucho más allá del siglo XVIII. Sin embargo, los niveles de bióxido de carbono atmosférico, medidos en el aire, son más elevados hoy día que en ningún otro momento durante los pasados 800 mil años. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2010a.

FIGURA 14



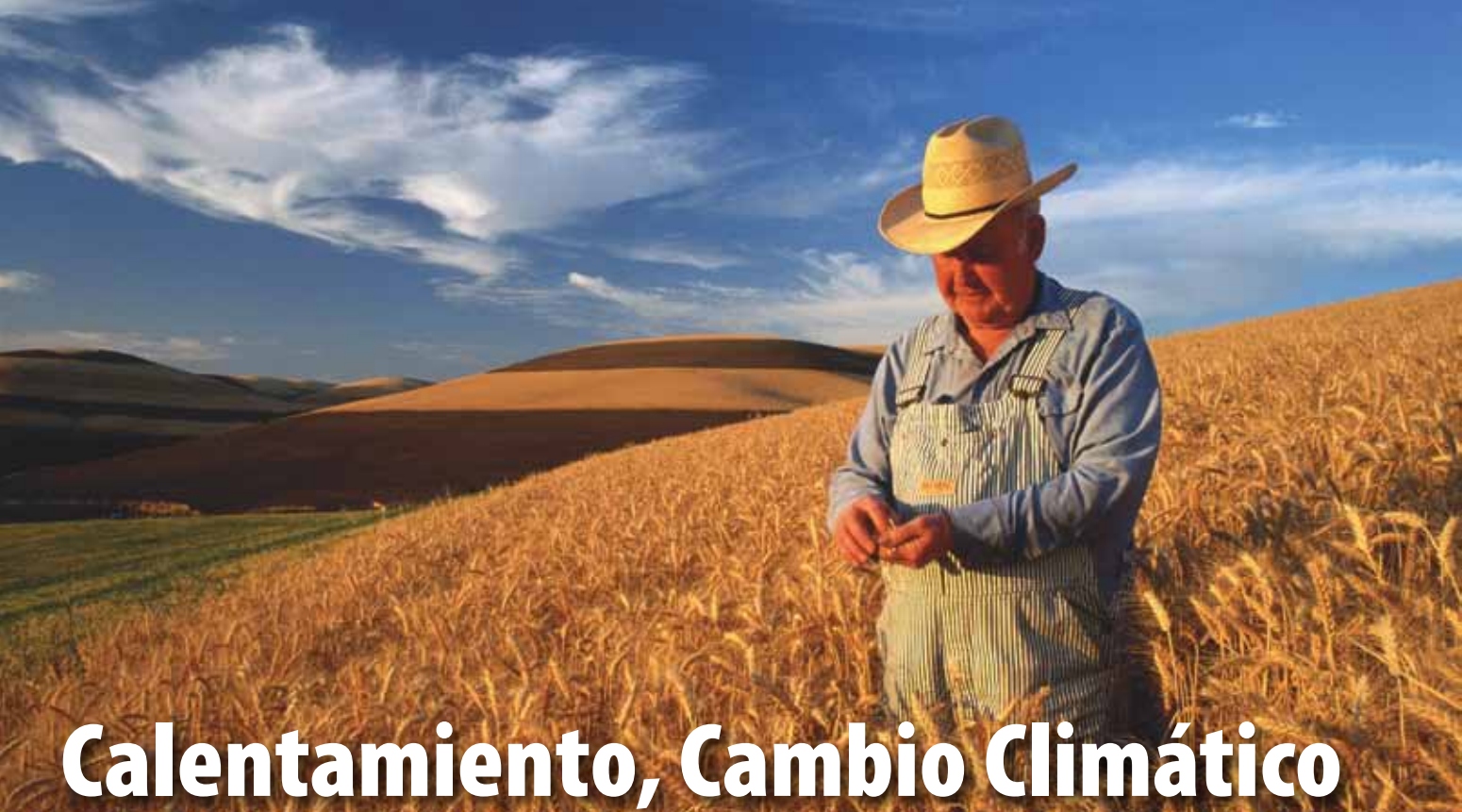
El Laboratorio Nacional de Núcleos de Hielo del Servicio de Levantamientos Geológicos de los Estados Unidos almacena muestras de núcleos de hielo tomadas en los casquetes polares y los glaciares de montaña. Los núcleos de hielo proporcionan indicios acerca de los cambios climáticos y atmosféricos ocurridos hace cientos de miles de años.

químicos señalan una enorme liberación de dióxido de carbono, que incrementó la temperatura de la Tierra en 9°F adicionales, generando la acidificación extensa de los océanos. Estos cambios climáticos se vieron acompañados por modificaciones masivas en los ecosistemas, tales como la aparición de muchas nuevas especies de mamíferos sobre la Tierra y la extinción de muchas especies en el fondo de los océanos.

conducen eventualmente a cambios mayores en las temperaturas globales. El cambio global promedio en temperatura durante un ciclo de la era glacial, que se presentan cada 100 mil años, es del orden de  $5^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  ( $9^{\circ}\text{F}\pm 2^{\circ}\text{F}$ ).

Los datos muestran que durante pasados ciclos glaciales, los cambios en la temperatura han conducido a –es decir, empezaron antes de– los cambios en  $\text{CO}_2$ . Esto se debe a que los cambios en temperatura, inducidos por cambios en la órbita de la Tierra alrededor del Sol, conducen a cambios graduales en la biosfera y en el ciclo de  $\text{CO}_2$ , y por lo tanto del  $\text{CO}_2$  mismo, reforzando la tendencia inicial de la temperatura. Por contraste, la liberación relativamente rápida de  $\text{CO}_2$  y otros gases con efecto invernadero desde el inicio de la Revolución Industrial, así como por la quema de combustibles fósiles, ha revertido en esencia el patrón: el  $\text{CO}_2$  adicional está actuando como un forzamiento climático con un incremento posterior de temperatura.

Los ciclos de las glaciaciones ilustran de manera clara cómo el forzamiento climático y los efectos de retroalimentación pueden modificar la temperatura de la Tierra, pero también existe evidencia directa de climas pasados que demuestran que grandes liberaciones de dióxido de carbono han causado un calentamiento global. Uno de los eventos más relevantes de este tipo se conoce como el máximo térmico del Paleoceno-Eoceno o PETM (por sus siglas en inglés), que ocurrió hace alrededor de 55 millones de años, cuando el clima de la Tierra era mucho más cálido que en el presente. Indicadores



# Calentamiento, Cambio Climático e IMPACTOS

## en el Siglo XXI y más allá

Parte II

**C**on la finalidad de poder dar respuesta efectiva a los riesgos planteados por un posible futuro cambio climático, los tomadores de decisiones necesitan contar con información acerca del tipo e intensidad de los impactos esperados.

Afortunadamente, la ciencia ha realizado grandes avances en la predicción de la magnitud de los cambios en temperatura que pueden ser esperados bajo diferentes escenarios de emisión de gases con efecto invernadero y en la comprensión sobre la forma en que se relacionan los incrementos de temperaturas globales promedio –incrementos de 1°C, 2°C, 3°C y así en adelante– con una amplia variedad de impactos. Muchos de éstos plantean serios riesgos para las sociedades humanas y con los bienes de interés de las personas, incluyendo los recursos hídricos, las zonas costeras, la infraestructura, la salud humana, la seguridad alimentaria, así como los ecosistemas terrestres y marinos.



## ¿Cómo proyectan los científicos el cambio climático a futuro?

El factor más importante para determinar el futuro calentamiento global consiste en proyectar las futuras emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases con efecto invernadero, lo que a su vez depende de la manera en que la gente produzca y consuma energía, las políticas nacionales e internacionales que puedan ser instrumentadas para controlar las emisiones, y las nuevas tecnologías que puedan estar disponibles.

Los científicos tratan de incorporar estas variables mediante la creación de diferentes escenarios que contemplen la evolución que pudieran tener las emisiones y por ende el forzamiento climático. Cada uno de estos escenarios está basado en estimaciones sobre la forma en que pueden modificarse a lo largo del tiempo diferentes factores socioeconómicos, tecnológicos y de política, incluyendo el crecimiento poblacional, la actividad económica, las prácticas de conservación de energía, las tecnologías energéticas y el uso de los suelos.

Los científicos emplean modelos climáticos (ver Recuadro 4, Pág. 14) para proyectar la forma

en la que el sistema climático responderá a los diferentes escenarios planteados según cambien las concentraciones de gases de efecto invernadero. Hay diferentes tipos de modelos desarrollados por diferentes grupos de investigadores. Cada uno emplea un conjunto ligeramente diferente de ecuaciones matemáticas para representar la forma en que la atmósfera, los océanos y otras partes del sistema climático interactúan entre sí y evolucionan a lo largo del tiempo. Los modelos son comparados en forma rutinaria entre sí y probados en relación con las observaciones para evaluar la precisión y solidez de las predicciones del modelo.

El conjunto más completo de experimentos de modelaje para proyectar los cambios climáticos globales fue terminado en 2005.<sup>2</sup> Incluyó 23 modelos diferentes de varios grupos alrededor del mundo,

<sup>2</sup> Los experimentos de modelaje fueron parte del proyecto *Programas de Investigaciones sobre Clima Global con Modelos Intercomparativos Acoplados - Fase 3 (CMIP3)*, en apoyo al Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), Cuarto Informe de Evaluación.

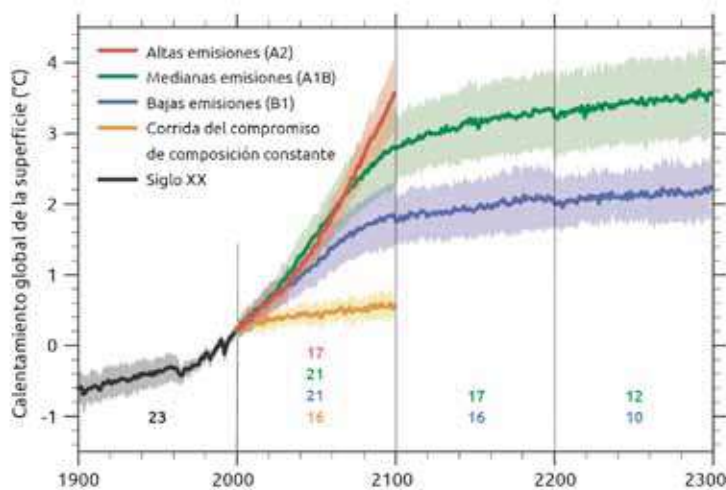


FIGURA 19

**Cambios de temperatura proyectados para tres escenarios de emisiones.** Los modelos proyectan cambios globales promedio en la temperatura durante el siglo XXI bajo diferentes escenarios de emisiones futuras –alto (rojo), medio (verde) y bajo (azul)–, cada uno de los cuales está basado en diferentes supuestos de crecimiento poblacional a futuro, desarrollo económico, preferencias de estilo de vida, cambios tecnológicos y disponibilidad de alternativas energéticas. También se muestran los resultados de las corridas del “compromiso de concentraciones constantes”, que presupone que las concentraciones atmosféricas de los gases con efecto invernadero se mantienen constantes después del año 2000. Cada línea sólida representa el promedio de las corridas del modelo a partir de diferentes modelajes que hacen uso del mismo escenario; las áreas sombreadas proporcionan una medida de la dispersión de los datos (una desviación estándar) entre los cambios de temperatura proyectados por los diferentes modelos. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2010a.

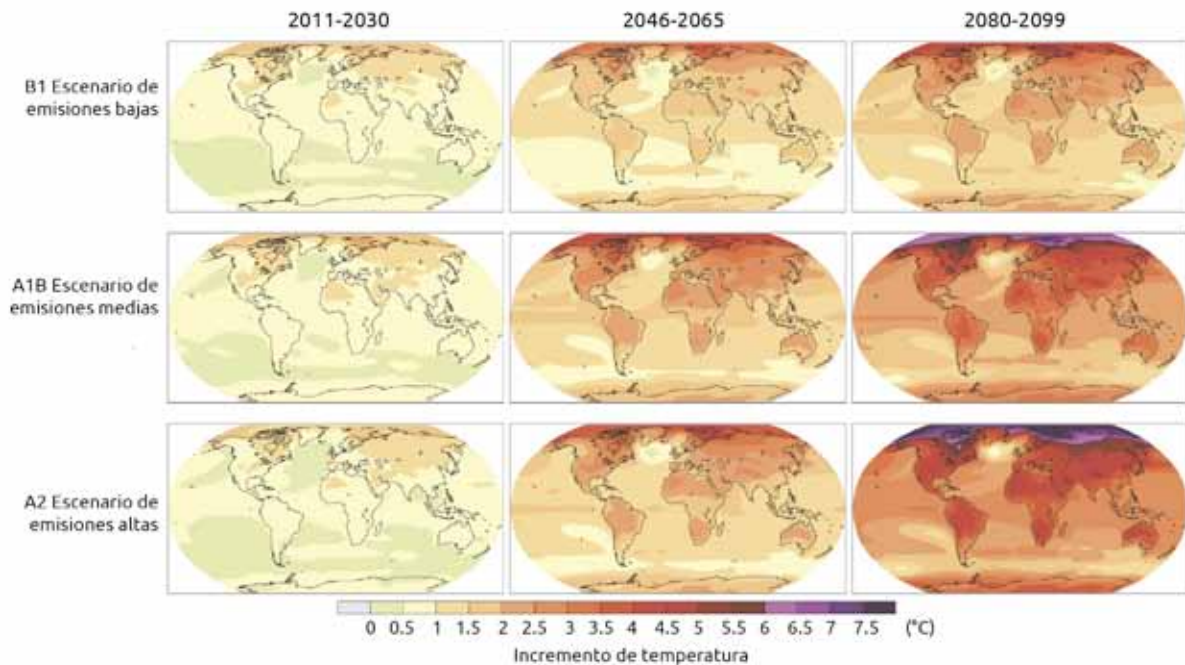
cada uno de los cuales usó el mismo conjunto de escenarios sobre la emisión de gases con efecto invernadero. (La Figura 19 muestra cambios proyectados sobre las temperaturas globales, asociados con emisiones futuras altas, medias y bajas además del calentamiento “comprometido”, es decir, el calentamiento que se llevará a cabo como resultado de los gases de efecto invernadero que ya han sido liberados). Los tres escenarios futuros de emisión de gases con efecto invernadero proyectan un

calentamiento continuo. Pero, para finales del siglo, se aprecian diferencias notables en las temperaturas globales promedio, con un incremento total en la temperatura para 2100, comparado con los finales del siglo 20, que va desde menor a 2°F (1.1°C) para el escenario de emisiones bajas, hasta más de 11°F (6.1°C) para el escenario de emisiones altas. Estos resultados muestran que las decisiones que se tomen a futuro pueden tener una influencia muy grande en la magnitud del cambio climático.

## ¿Cómo se verán afectadas las temperaturas?

Las temperaturas locales varían considerablemente día con día, semana a semana y de estación en estación, pero ¿cómo se verán afectadas en promedio? Quienes modelan el clima han empezado a estimar la elevación promedio en la temperatura que puede ser esperada en diferentes regiones (Figura 20). Los calentamientos locales sobre

cada punto del mapa se dividen entre el valor correspondiente de calentamiento global promedio y rinden una idea de los patrones de calentamiento que podrían esperarse. Los datos muestran que el calentamiento será mayor en las altas latitudes y significativamente mayor sobre la superficie de la tierra que sobre los océanos.



**FIGURA 20**

**Calentamiento proyectado para tres escenarios de emisiones.** Los modelos proyectan patrones geográficos de cambio anual promedio de las temperaturas aire-superficie en tres periodos de tiempo futuro distintos (comparados con las temperaturas promedio para el periodo 1961-1990) para tres escenarios diferentes de emisiones. El calentamiento proyectado hacia fines del siglo XXI es menos extremo en el escenario B1, que presupone emisiones de gases con efecto invernadero más reducidas que en los escenarios A1B o el A2 “escenario que mantiene el *status quo*”. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2010a



**Proyecciones de Días más Calurosos.** Las proyecciones de los modelos sugieren que, en comparación con las décadas de los sesenta y setenta, el número de días con un índice de calor mayor de 100°F se incrementará notablemente a todo lo largo de los Estados Unidos. Imagen cortesía de Programa de los Estados Unidos de Investigaciones sobre Clima Global.

Conforme continúan incrementándose las temperaturas promedio, se proyecta que el número de días con un índice de calor arriba de 100°F (el índice de calor combina temperatura y humedad para determinar la sensación de calor) continuará incrementándose durante el presente siglo (Figura 21). Para fines de esta centuria, se espera que el centro de los Estados Unidos experimente 60 a 90 días adicionales al año en los que el índice de calor supere los 100°F. Se espera que las olas de calor también duren más tiempo conforme se eleve la temperatura anual promedio. En consecuencia, conforme se incrementan las temperaturas globales, también se incrementarán los riesgos de enfermedades y defunciones relacionadas con el calor. De igual manera puede afirmarse que disminuirán los fríos extremos y las consecuencias que sobre la salud pueden atribuirse a las bajas temperaturas. Se proyecta que la relación de temperaturas altas a temperaturas bajas, que en la actualidad es de 2 a 1, se incrementará bajo un escenario medio de emisiones de 20 a 1 para mediados del siglo, y de 50 a 1 para finales.

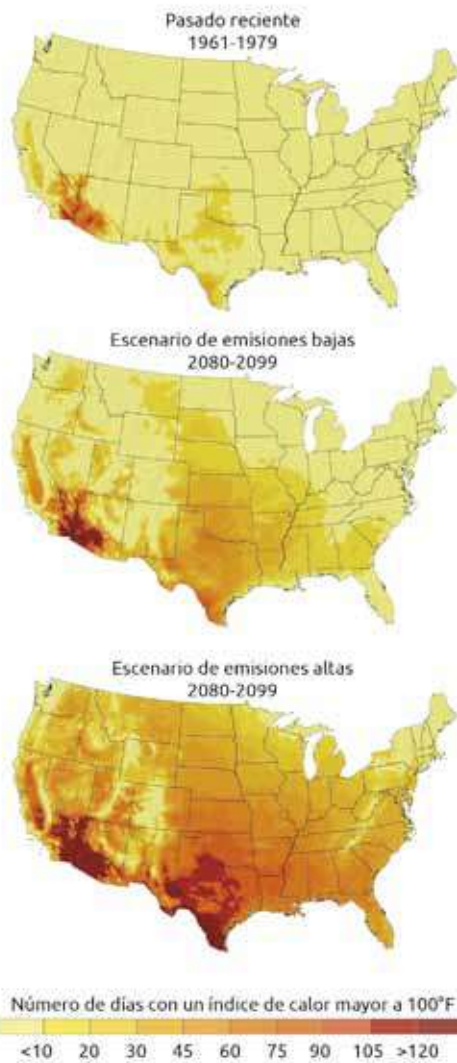


FIGURA 21

## ¿Cómo se espera que se modifiquen las precipitaciones?

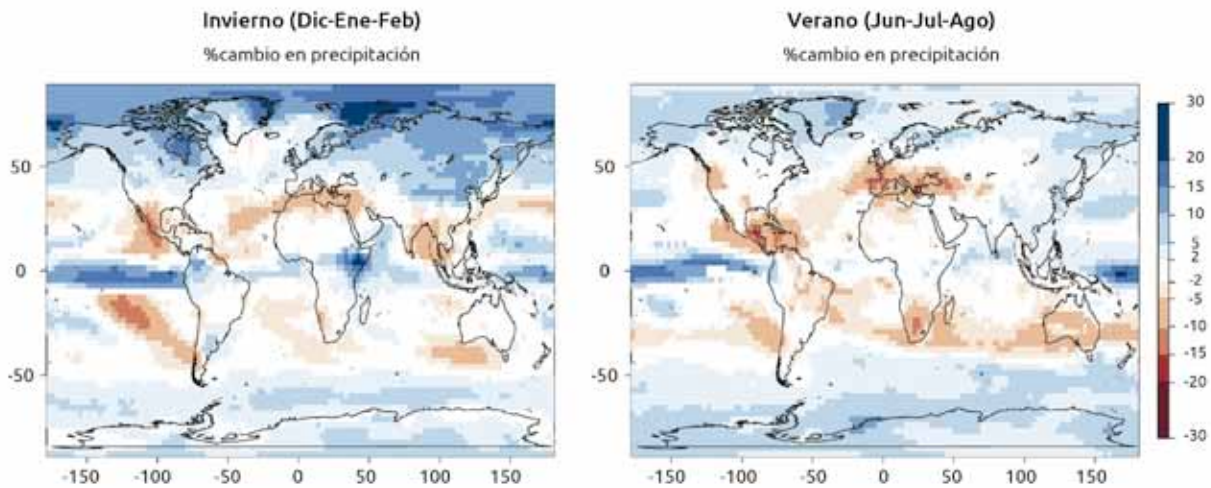
Se espera que el calentamiento global regional intensifique los contrastes regionales ya existentes en precipitaciones: se espera que las áreas secas se vuelvan aun más áridas, y las áreas húmedas sean aun más húmedas. Esto se debe a que las temperaturas calurosas tienden a incrementar la evaporación en los océanos, lagos, plantas y suelos. Esto de acuerdo a las consideraciones teóricas y a las observaciones experimentales,



elevara la cantidad de vapor de agua en la atmósfera en un 7% por cada 1°C (1.8°F) de calentamiento.

Si bien una mayor evaporación proporciona mayor humedad atmosférica que genera lluvia y nieve en algunas áreas situadas en la dirección del viento, también deseca la superficie del terreno, lo que exacerba los impactos de la sequía en algunas regiones.

Haciendo uso del mismo enfoque general para las temperaturas, los científicos pueden proyectar cambios porcentuales regionales y estacionales



**FIGURA 22**

**Patrones de Precipitación por Grado de Calentamiento.** Las temperaturas más elevadas incrementan la evaporación de los océanos, lagos, la vegetación y los suelos, emitiendo más vapor de agua a la atmósfera, a la vez que se producen más lluvias y nieve en algunas áreas. Sin embargo, un incremento en la evaporación también deseca la superficie del terreno, lo que reduce la precipitación en algunas regiones. Esta figura muestra los cambios porcentuales previstos por 1°C (1.8°F) de calentamiento global invernal (diciembre-febrero, izquierda) y veraniego (junio-agosto, derecha). Las áreas en azul muestran los lugares donde se proyecta una mayor precipitación, y las áreas en rojo muestran donde se predice menor precipitación. Las áreas en blanco muestran sitios en los cuales los cambios son inciertos en la actualidad, ya que no hay suficiente acuerdo entre los modelos aplicados de si habrá una mayor o menor precipitación en esas regiones. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011b.

en las precipitaciones esperadas por cada grado centígrado (1.8°F) de calentamiento global (Figura 22). Los resultados muestran que las regiones subtropicales, donde se concentran la mayoría de los desiertos del planeta, probablemente vean una disminución de 5-10% en la precipitación por cada grado de calentamiento global. Por contraste, en las regiones subpolares y polares se espera ver incrementos en la precipitación, particularmente durante el invierno. El patrón general de cambio en los Estados Unidos continentales es algo complejo, ya que se localiza entre las regiones subtropicales, que en México y el Caribe se están volviendo más áridas, y las regiones subpolares del Canadá, en proceso de humidificación. La mayoría de los modelos sugiere incrementos en la desertificación en el suroeste de los Estados Unidos.

Las observaciones realizadas en muchas partes del mundo muestran un incremento estadísticamente significativo en la intensidad de las lluvias fuertes. Los modelos computacionales demuestran que esta tendencia continuará conforme se caliente la Tierra, incluyendo a las



regiones subtropicales, en donde la precipitación general irá en decremento. En estas regiones, las proyecciones muestran un incremento de días secos entre las tormentas pluviales, con una disminución en la precipitación promedio de las lluvias estacionales. En general, las lluvias extremas se intensificarán de 5-10% por cada grado centígrado (1.8°F) de calentamiento global, presentándose las más importantes en los trópicos, donde las lluvias son más fuertes.

Los cambios en precipitación afectarán el caudal anual de las corrientes, que es aproximadamente igual a la cantidad del escurrimiento –el agua del deshielo o la lluvia que ingresa en ríos y arroyos. Con relación a esto, los modelos climáticos globales indican que los escurrimientos futuros posiblemente decrezcan en la mayoría de los Estados Unidos, a excepción de ciertas partes del noroeste y noreste, presentándose decrementos particularmente notables en el suroeste. Se espera una disminución de los escurrimientos entre 5 a 10% por cada grado centígrado de calentamiento en

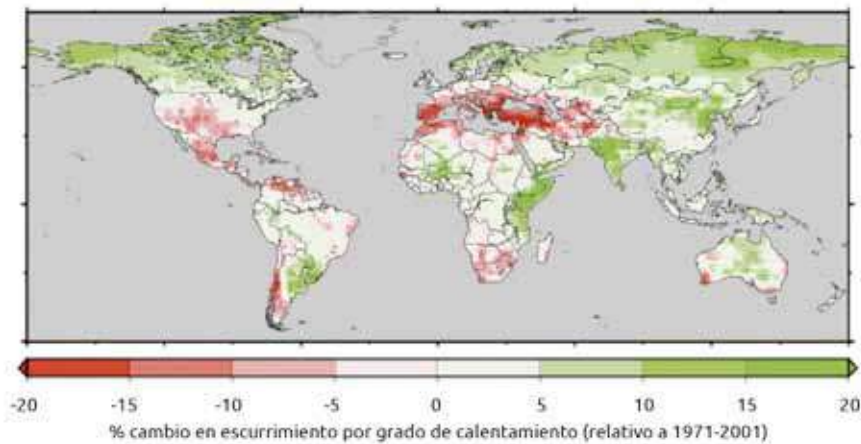


FIGURA 23

**Cambios en los Esgurrimientos por Grado de Calentamiento.** Se proyecta que una elevación en la evaporación causada por el calentamiento disminuirá la cantidad de escurrimientos –el agua que fluye dentro de ríos y arroyos– en muchas partes de los Estados Unidos. Los escurrimientos representan un índice clave de disponibilidad de agua dulce. La figura muestra el porcentaje medio de cambio en escurrimientos por grado de calentamiento global relativo al periodo de 1971 a 2000. Las áreas en rojo muestran donde se espera que los escurrimientos se reduzcan; las áreas en verde donde se incrementarán. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011a.

algunas cuencas fluviales, incluyendo la del río Arkansas y el río Grande (o Bravo) (Figura 23). Esta disminución se deberá principalmente al incremento en la evaporación debida a las altas temperaturas, misma que no será compensada por cambios en la precipitación. Globalmente, y a excepción de Eurasia, el flujo de las corrientes en muchas cuencas hidrográficas templadas probablemente decrecerá de manera particular en las regiones áridas y semiáridas.

Por lo tanto es de esperar que el incremento en las temperaturas, la evaporación y la sequía aumente el riesgo de incendios en algunas regiones. En general, los bosques con tendencia a los incendios, tales como los bosques siempre verdes<sup>3</sup> del oeste de los Estados Unidos y el Canadá, mostrarán seguramente una mayor vulnerabilidad a los incendios forestales conforme de incrementen las temperaturas. Se espera que la superficie promedio destruida por fuegos arrasadores en la porción oeste de los Estados Unidos

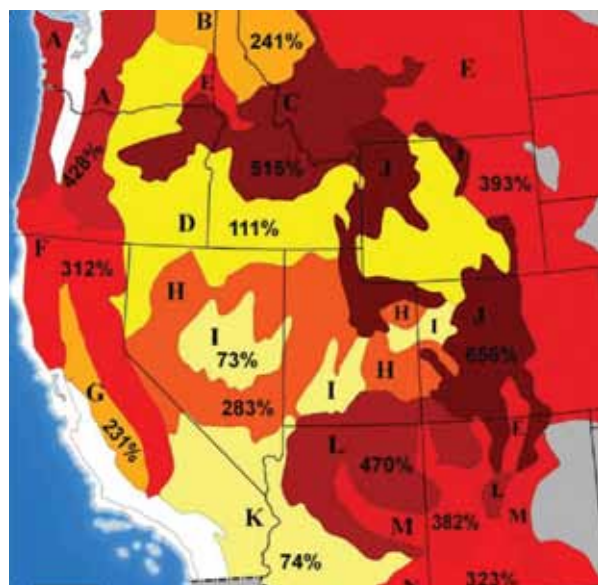


FIGURA 24

<sup>3</sup> Principalmente de pino y oyamel, con altos contenidos de resina (N.T.)

**Incrementos en los Riesgos de Incendios.** Se espera que el aumento de temperaturas y el incremento en evaporación aumenten los riesgos de incendios en muchas regiones del oeste (de los EEUU). Esta figura muestra el incremento porcentual de áreas incendiadas en el oeste por cada grado centígrado de incremento en la temperatura anual global, comparado con la media de área quemada durante 1950-2003. Por ejemplo, se espera que el daño por incendios en los bosques del norte de las Montañas Rocallosas, señalado como Región B, se duplique anualmente por cada 1°C (1.8°F) de incremento en temperaturas globales promedio. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011a.

aumente anualmente de dos a cuatro veces por cada grado de calentamiento (Figura 24). Al mismo tiempo, áreas dominadas por arbustos y pastizales, tales como ciertas regiones del suroeste, pueden experimentar una reducción de los incendios en el

tiempo, por la desaparición de pastos y arbustos a causa del aumento de la temperatura. En este caso, los beneficios potenciales a la sociedad de la reducción en los incendios serían contrarrestados por la pérdida de los ecosistemas existentes.

## ¿Cómo se verán afectados los hielos marinos y la nieve?

Conforme el calentamiento global persiste, la extensión, grosor y permanencia de las diferentes formas de hielo en el planeta se reducen. Los modelos indican que las aguas abiertas, libres de hielo, en el océano Ártico se incrementarán probablemente antes de finales de este siglo, y sugieren también una pérdida aproximada de 25% en la extensión de los hielos marinos por cada grado centígrado (1.8°F) de calentamiento global.

En contraste con el Ártico, los hielos polares marinos que rodean a la Antártida se han ampliado en promedio durante las pasadas décadas. Este incremento puede estar ligado al agujero de ozono en la estratosfera sobre la Antártida, mismo que se generó por el uso de químicos destructores del ozono contenidos en refrigeradores y latas de aerosol. El agujero en la capa de ozono permite que una mayor cantidad de rayos UV llegue a las capas inferiores de la atmósfera y en la Antártida esto podría también haber producido temperaturas más bajas conforme más calor escapaba hacia el espacio. Sin embargo, se espera que este efecto disminuya conforme los niveles de ozono regresen a la normalidad durante este siglo, debido en parte al éxito del Protocolo de Montreal, un tratado internacional

que prohibió el uso de sustancias destructoras de ozono. A pesar de ello, la capa de hielo antártica puede disminuir menos rápido que el hielo del Ártico, en parte debido a que el océano austral almacena el calor a mayores profundidades que los océanos árticos, por lo cual el calor no puede fundir los hielos tan fácilmente.



En muchas zonas del planeta se espera una disminución de la cubierta de nieve, la acumulación de nieve en la época fría se retrasará y se fundirá más rápido durante la primavera. De acuerdo con un análisis de sensibilidad, cada grado centígrado (1.8°F) de calentamiento local puede conducir a una reducción promedio de 20% en la acumulación de nieve en la porción oeste de los Estados Unidos. El cúmulo de nieve tiene una fuerte

implicación para el abasto de agua potable y la producción de energía hidroeléctrica. En lugares tales como Siberia, partes de Groenlandia y la Antártida, donde las temperaturas son lo suficientemente bajas para mantener la nieve durante largos períodos, la cantidad de nieve depositada puede aumentar, aun si la temporada de nieve se reduce, ya que el incremento en la cantidad de vapor de agua asociada con temperaturas más altas puede producir una mayor caída de nieve.

# ¿Cómo se verán afectadas las zonas costeras?

Algunas de las regiones más densamente pobladas del planeta se localizan en las zonas costeras, generando una preocupación con el incremento del nivel de los océanos. Se proyecta que el incremento en el nivel del mar continuará durante siglos en respuesta al incremento en los gases de efecto invernadero producidos por el ser humano, se estima una elevación media del mar de 0.5-1.0 metros (20-39 pulgadas) para el año 2100. Sin embargo, existe evidencia que la elevación del nivel del mar podría ser mayor de lo esperado debido al derretimiento de los hielos marinos. Estudios recientes han mostrado un derretimiento de glaciares y capas de hielo más acelerado de lo esperado. El incremento observado en el nivel del mar se encuentra cercano a los rangos más altos en las proyecciones realizadas en 1990 (Figura 25).

La cuantificación de las amenazas futuras específicas que puedan sufrir las zonas costeras debido a incrementos en el nivel del mar e inundaciones representa un reto. Muchos factores no climáticos entran en consideración, como por ejemplo los lugares seleccionados por la gente para construir sus viviendas cuyo riesgo puede variar

enormemente de un lugar a otro. Otro tanto son los daños causados por eventos climáticos extremos como los huracanes y terremotos. Extensas áreas urbanas de deltas costeros, como las de los ríos Mississippi, Nilo, Ganges y Mekong, son las que presentan mayores riesgos.

Si el nivel medio del mar sube 0.5 metros (20 pulgadas) en relación con la línea base de 1990, las inundaciones costeras podrían afectar entre 5 y 200 millones de personas a nivel mundial. Cerca de 4 millones de personas podrían verse desplazadas permanentemente, y la erosión podría afectar más de 250,000 kilómetros cuadrados de humedales y terrenos secos aledaños (98,000 millas cuadradas, un área del tamaño de Oregon). A lo largo de la costa de Alaska ya están llevándose a cabo reubicaciones forzadas de aquellos poblados donde las reducciones en la capa del hielo y el derretimiento del suelo congelado están ocasionando que el oleaje golpee y erosione la línea de costa. Los efectos de la erosión costera ante un incremento del nivel del mar de un metro serían mucho más pronunciados, y amenazarían amplias regiones de la costa de los Estados Unidos (Figura 26).

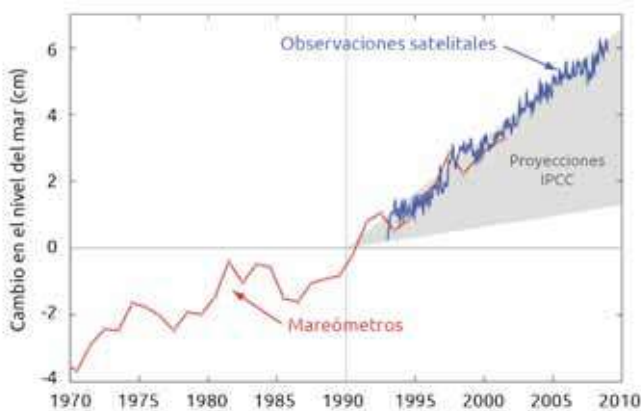


FIGURA 25

**Comparación de Elevaciones en el Nivel del Mar Observadas y Proyectadas.** Cambios observados en el incremento del nivel del mar desde 1990 han alcanzado casi el tope del rango de incremento proyectado en el Tercer Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, publicado en 1990 (área sombreada en gris). La línea roja muestra datos obtenidos con mareógrafos de 1970 a 2003. La línea en azul muestra observaciones satelitales de cambios en el nivel del mar. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011a.



FIGURA 26

**Efectos proyectados del Incremento del Nivel del Mar en la Costa Este y Golfo de México de los Estados Unidos.** Si el nivel del mar se incrementara hasta un metro (3.3 pies), el área en rosa sería susceptible a la inundación costera. Con un incremento de 6 metros (19.8 pies) en el nivel del mar, las áreas mostradas en rojo también serían vulnerables. La gráfica circular muestra el porcentaje de área de algunas ciudades que potencialmente son vulnerables a incrementos del mar de 1 y 6 metros. Fuente Consejo Nacional de Investigación, 2011a.

# ¿Cómo se verán afectados los ecosistemas?

Ya sean marinos o terrestres, todos los organismos tratan de adaptarse a los ambientes cambiantes, o bien desplazarse hacia localidades más favorables; pero el cambio climático amenaza a ciertas especies más allá de sus posibilidades de adaptación o desplazamiento. Las especies adaptadas al frío de las cumbres montañosas y de latitudes altas están siendo expuestas a un estrés especial. Un corrimiento en la temporalidad de las estaciones y eventos del ciclo de vida, tales como la floración, reproducción y eclosión, están generando desfases entre las especies que interrumpen patrones de alimentación, polinización y otros aspectos clave de las redes alimenticias. La habilidad de desplazamiento y adaptación de las especies también se ve obstaculizada por barreras físicas de infraestructura (por ej., caminos), usos del suelo, así como la competencia o interacción con otras especies.

En los océanos, los cambios en los patrones de circulación serán un motor clave de impacto en los ecosistemas. Datos satelitales muestran que las cálidas aguas de superficie se están mezclando en menor grado con aguas más frías y profundas, aislando formas de vida marina que habitan cerca de los nutrientes subyacentes, reduciendo la cantidad de fitoplancton que es la base de la red alimentaria oceánica (Figura 27). El cambio climático va a exacerbar este problema

en las regiones tropicales y subtropicales. Sin embargo, en aguas templadas y polares, la mezcla vertical de las aguas podría verse incrementada, la fusión de los hielos polares y el calentamiento de los océanos impulsará el desplazamiento de muchas especies marinas hacia los polos.

Una química oceánica cambiante puede generar otros impactos; aguas más calientes pueden conducir a una disminución de oxígeno subsuperficial, incrementando el riesgo de “zonas muertas”,<sup>4</sup> en donde los consumidores secundarios (como los tiburones, delfines y atunes, por ejemplo) se encuentran ausentes debido a una falta de oxígeno. La acidificación del océano causada por un incremento en la tasa de absorción del exceso de CO<sub>2</sub> por los océanos amenazarán a muchas especies con el tiempo, en particular a moluscos y arrecifes coralinos. Pero no todas las formas de vida van a sufrir. Algunos tipos de fitoplancton y otros organismos fotosintetizadores podrían verse beneficiados por los incrementos de CO<sub>2</sub>. Esta claro que la acidificación del océano irá en aumento de seguir aumentando las emisiones CO<sub>2</sub> en las siguientes décadas.

<sup>4</sup> Se conocen como “zonas muertas” las áreas carentes o con bajo contenido de oxígeno, llamadas técnicamente zonas hipóxicas. (N.T.)

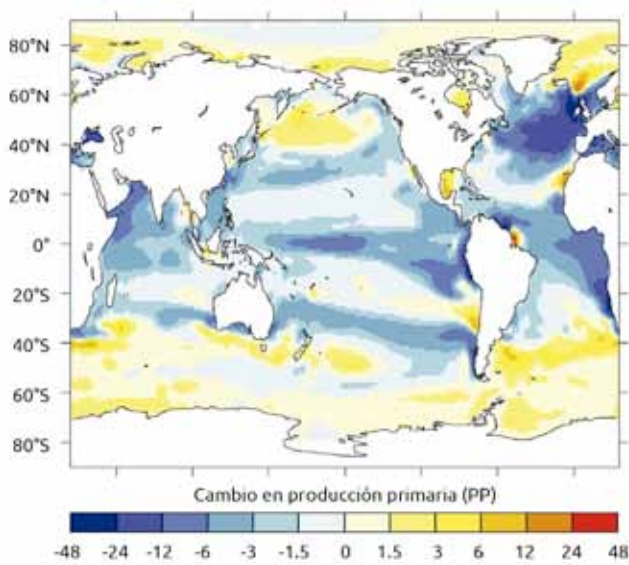


FIGURA 27



La pica americana (*Ochotona princeps*) es una especie adaptada al frío que está quedando aislada en “islas” sobre los picos montañosos por el incremento en la temperatura. Imagen cortesía de J.R. Douglass, Parque Nacional de Yellowstone.

**Efectos sobre la Trama Alimentaria Oceánica.** La tasa de crecimiento del fitoplancton marino, que forma la base de la cadena alimenticia de los océanos, probablemente se vea reducida con el tiempo debido a temperaturas superficiales más elevadas en los océanos. Esto genera una mayor separación entre las aguas superficiales más cálidas y las aguas más frías de profundidad, separando a la vida marina de superficie de los nutrientes presentes en aguas más profundas. La figura muestra cambios en el crecimiento del fitoplancton (producción primaria media anual verticalmente integrada o PP), expresados como la diferencia porcentual entre 2090-2099 y 1860-1869 por 1°C (1.8°F) de calentamiento global. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011a.

# ¿Cómo se verán afectadas la agricultura y la producción de alimentos?

El estrés del cambio climático en la agricultura puede afectar la seguridad alimentaria mundial. Si bien un incremento en la cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera favorece el crecimiento de muchas plantas, esto no necesariamente se traduce en más alimentos. Las cosechas tienden a desarrollarse más rápidamente a temperaturas más elevadas, pero con períodos de crecimiento más cortos tienen menos tiempo para producir cereales. Adicionalmente, un clima cambiante traerá riesgos como un mayor estrés hídrico y picos más elevados de temperatura que pueden dañar rápidamente los cultivos.

Los impactos sobre la agricultura variarán de manera regional y por tipo de cosecha. Un calentamiento moderado e incrementos asociados del CO<sub>2</sub>, con cambios en las precipitaciones, benefician a las cosechas y pastizales en latitudes medianas y altas, pero darán rendimientos reducidos en áreas estacionalmente secas y bajas latitudes. En California, donde se cultiva la mitad de las frutas y hortalizas de los Estados Unidos, se estima que el cambio climático reducirá los rendimientos de las cosechas de nueces de nogal, almendras y aguacates y uvas hasta un 40% para 2050. Evaluaciones regionales en otras partes del mundo concluyen, de manera consistente, que el cambio climático presenta serios riesgos para las cosechas de alimentos básicos críticos en África sub-Sahariana y en lugares que dependen de fuentes de agua originadas en los deshielos glaciares y las capas de nieve.

Modelajes indican que el beneficio relacionado con la presencia de altos niveles de CO<sub>2</sub> para algunas cosechas se verá sobrepasado por factores negativos si los incrementos globales en temperatura van más allá de 1.0°C (1.8°F) en función de los valores encontrados hacia finales del siglo XX (Figura 28), proyectándose los siguientes impactos:



- Por cada grado de calentamiento, los rendimientos de maíz en los Estados Unidos y África, así como de trigo en la India, bajarán entre 5-15%.

- Las plagas agrícolas, malezas y enfermedades se redirigirán en rango geográfico y frecuencia.

- Si se llegase a alcanzar un calentamiento global de 5°C (9°F), la mayoría de las regiones de la Tierra experimentarían pérdidas en sus rendimientos y los precios mundiales de granos potencialmente se duplicarían.

Los productores en áreas prósperas podrán adaptarse a estas amenazas variando los cultivos que manejan y las temporadas en que son cultivados. Sin embargo, la adaptación puede ser menos eficaz en lugares donde el calentamiento local sobrepasa los 2°C (3.6°F) y será limitada en los trópicos, donde la época de crecimiento se ve restringida por la humedad, más que por la temperatura.

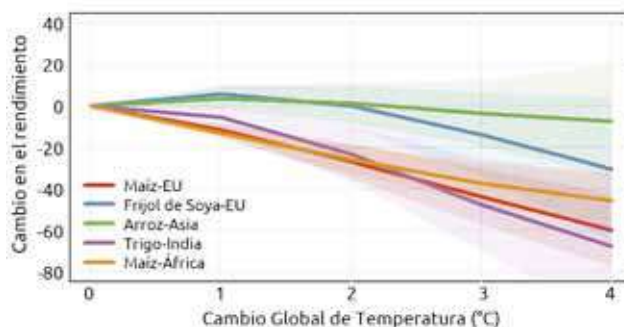


FIGURA 28

**Pérdidas de Rendimiento en las Cosechas por Grado de Calentamiento.** Se proyecta que la producción de maíz en los Estados Unidos y África, y de trigo en India, disminuirá en 5-15% por grado de calentamiento global. Esta figura también muestra cambios proyectados en el rendimiento por grado de calentamiento para la soja de los EEUU y el arroz en Asia. Los impactos esperados en el rendimiento de las cosechas son tanto por el calentamiento como el incremento de CO<sub>2</sub>, asumiendo que no se adaptarán los cultivos. Las regiones sombreadas muestran los posibles rangos de las proyecciones (67%). Los valores del cambio global de temperatura son relativos a los valores preindustriales; las temperaturas globales actuales son aproximadamente 0.7°C (1.3°F) por encima de este valor. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011a.



# Tomando **DECISIONES**

Parte III

## sobre el Cambio Climático

**U**n sólido conjunto de evidencias muestra que el cambio climático que está ocurriendo se debe principalmente a las actividades humanas y que plantea riesgos significativos para un amplio espectro de sistemas naturales y humanos.

Como resultado, las personas encargadas de tomar decisiones de todo tipo –incluyendo a los individuos, empresas y los gobiernos en todos sus niveles– están tomando o contemplan tomar acciones para responder al cambio climático. Dependiendo de la magnitud en la reducción de las emisiones, el futuro podría traer un cambio relativamente suave en el clima o bien traer consigo cambios extremos que podrían durar miles de años. Las iniciativas científicas de las naciones pueden contribuir a limitar la magnitud del cambio climático y promover la adaptación a sus impactos, tanto mediante una continuada comprensión de las causas y consecuencias del cambio climático, como mediante la mejora y expansión de las opciones disponibles.



# ¿De qué manera aporta la ciencia para tomar decisiones sobre las emisiones?

Como se vio en la Parte II de este folleto, las mejoras en nuestras habilidades para predecir los impactos del cambio climático por grados de calentamiento han facilitado la determinación de los riesgos del cambio climático. Se deja a los desarrolladores de políticas abordar dos temas centrales: (1) ¿A qué nivel de calentamiento son aceptables los riesgos, dados los costos para limitarlos?; y (2) ¿qué nivel de emisiones mantendrá a la Tierra dentro de ese nivel de calentamiento? La ciencia no puede responder a la primera pregunta, ya que involucra muchos juicios de valor que caen fuera del dominio de la ciencia. Sin embargo, mucho se ha avanzado en generar una respuesta a la segunda pregunta.

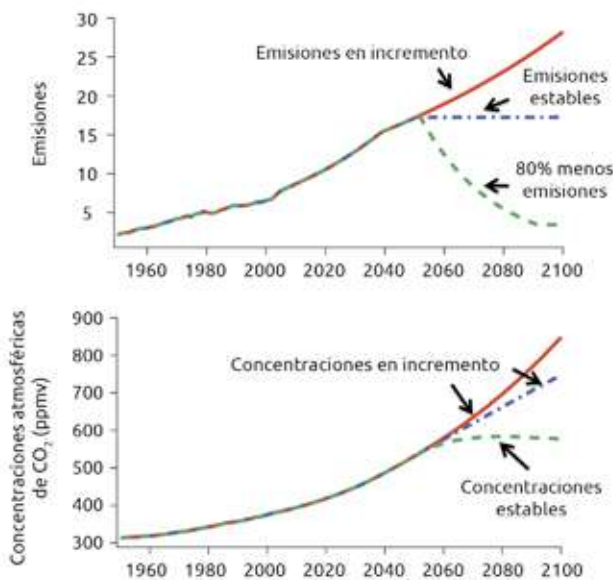


FIGURA 29

**Ejemplo ilustrativo: cómo se relacionan las emisiones con las concentraciones de CO<sub>2</sub>.** Se requieren fuertes reducciones en las emisiones para detener el incremento en las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> y alcanzar cualquier meta estándar de estabilización. Las gráficas muestran cómo los cambios en las emisiones de carbono (panel superior) están relacionadas con cambios en las concentraciones atmosféricas (panel inferior). Tomaría una reducción de 80% en las emisiones (línea verde, panel superior) para estabilizar las concentraciones atmosféricas (línea verde, panel inferior) para cualquier meta de estabilización elegida. Las emisiones estabilizadoras (línea azul, panel superior) resultarían en un incremento constante en las concentraciones atmosféricas (línea azul, panel inferior), pero no tan pronunciado como el incremento que se daría si las emisiones continuaran aumentando (línea roja). Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011a.

Aun con las mejoras esperadas en la eficiencia energética, si el mundo continúa “como si nada” en la forma en que usa y produce energía, las emisiones de CO<sub>2</sub> continuarán acumulándose en la atmósfera, calentando la Tierra.<sup>5</sup> Como lo muestra la Figura 29, para mantener las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> más o menos estables durante algunas décadas a determinado nivel para evitar los impactos del cambio climático, las emisiones globales tendrían que verse reducidas en 80%.

Otro concepto oportuno indica que la cantidad de calentamiento que se espera a partir de las emisiones de CO<sub>2</sub> depende de la cantidad acumulada de emisiones de carbono, y no de cuán rápido o despacio el carbono sea emitido a la atmósfera (Figura 30). Los seres humanos han emitido cerca de 500 mil millones de toneladas (gigatoneladas) de carbono a la fecha. Las mejores estimaciones indican que añadir cerca de 1,150 mil millones de toneladas de carbono al aire llevaría a un calentamiento medio global de 2°C (3.6°F).

<sup>5</sup> Otros gases de efecto invernadero son un factor a considerar, pero el CO<sub>2</sub> es, por mucho, el más importante gas con efecto invernadero en cuanto a los efectos de largo plazo del cambio climático.

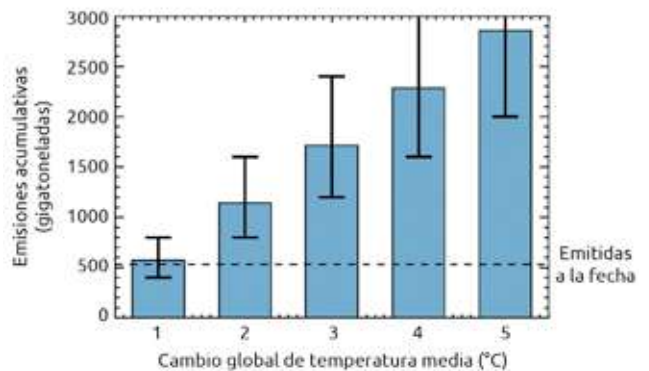


FIGURA 30

**Emisiones Acumulativas e incremento en Temperatura Media Global.** Estudios recientes muestran que para una selección específica de temperatura de estabilización climática, habría sólo un cierto rango de emisiones acumulativas de carbono permisibles. Los seres humanos han emitido un total de cerca de 500 millones de millones de toneladas (gigatoneladas) de emisiones de carbono a la fecha. Las barras de error dan cabida a la incertidumbre en la estimación en cuanto al ciclo de carbono (qué tan rápido es absorbido el CO<sub>2</sub> por los océanos) y en las respuestas del clima a las emisiones de CO<sub>2</sub>. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2011a.

Añadir CO<sub>2</sub> más rápido llevaría a las temperaturas a ese nivel más rápidamente, pero el valor en sí mismo cambiaría muy poco.

Dado que las emisiones acumulativas son lo que importa, las políticas orientadas al muy largo plazo (varias décadas a futuro) podrían concentrarse menos en especificar exactamente cuándo deben llevarse a cabo las reducciones y más en cuanto a la cantidad de emisiones totales que deberán ser permitidas en el largo plazo; de hecho, un balance o “presupuesto de carbono”. Tal balance deberá especificar la cantidad total de gases con efecto invernadero que puede ser emitida durante un periodo específico (digamos, de ahora a 2050).

Poder alcanzar un balance específico de emisiones es más probable mientras más pronto y más agresivamente se trabaje en reducir las emisiones (Figura 31). Es como ponerse a dieta. Si una persona quiere perder 40 libras para un cierto evento en el

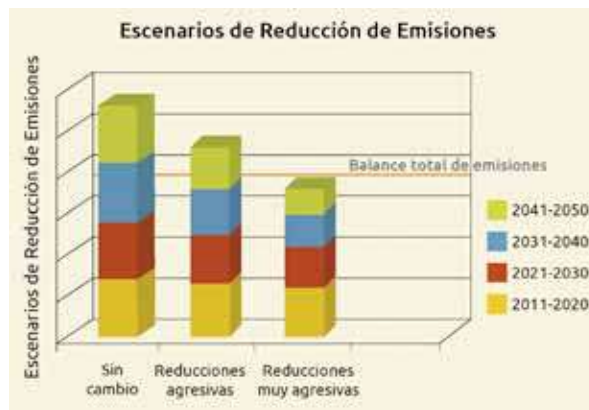


FIGURA 31

**Cumpliendo con un Balance de Carbono.** Cumplir con cualquier balance de carbono será más fácil mientras más pronto y agresivamente se instrumenten acciones para reducir las emisiones. Fuente: Consejo Nacional de Investigación.

futuro, es más fácil alcanzar esa meta si él o ella empieza a comer menos y a ejercitarse más lo más pronto posible, y no esperar un mes antes del evento para empezar.

## ¿Cuáles son las alternativas para reducir las emisiones de gases con efecto invernadero?

Como se vio anteriormente, para limitar el cambio climático en el largo plazo, el gas con efecto invernadero más importante y que debe ser controlado es el dióxido de carbono, que en los Estados Unidos es emitido principalmente por la quema de combustibles fósiles. La Figura 32 muestra la cantidad relativa de emisiones de fuentes residenciales, comerciales, industriales y de transporte. El caso realmente no es privarse, sino más bien ser más sensatos en la forma como producimos y empleamos la energía.

Los Estados Unidos son responsables de cerca de la mitad de las emisiones de origen antrópico de CO<sub>2</sub> ya presentes en la atmósfera, y que en la actualidad corresponden a cerca de 20% de las emisiones globales de este gas, a pesar de representar tan sólo 5% de la población mundial. Se proyecta que el porcentaje que aportan los EEUU al total global de emisiones disminuirá en las próximas décadas, conforme se incrementan las emisiones de los países en vías rápidas de desarrollo, tales como China e India. Por lo tanto, la



reducción en las emisiones de los Estados Unidos por sí solas, no será adecuada para sustraerse a los riesgos del cambio climático. Sin embargo, un firme liderazgo de los Estados Unidos, demostrado mediante enérgicas acciones domésticas, podría ayudar a influir en otros países a proseguir esfuerzos serios de reducción de emisiones.

Varias opciones clave se encuentran disponibles para reducir la cantidad de dióxido de carbono acumulado en la atmósfera (Figura 33), incluyendo: **Reducir la demanda subyacente de bienes y servicios que requieren energía**, por ejemplo, expandiendo programas de educación e incentivos para influir en el comportamiento y preferencias del consumidor; limitar patrones de aglomeraciones urbanas que mantienen nuestra dependencia sobre el petróleo. **Mejorar la eficiencia mediante la cual se hace uso de la energía**, por ejemplo, usando métodos más eficientes de aislamiento térmico, calefacción, enfriamiento e iluminación de construcciones; actualizando equipos industriales y procesos para ser más eficientes,

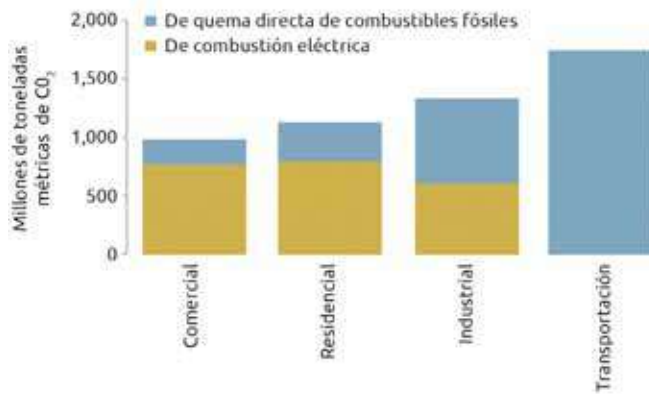


FIGURA 32

Emisiones de gases con efecto invernadero de los Estados Unidos en 2009 muestran la contribución relativa de cuatro usos terminales: residencial, comercial (por ejemplo, tiendas departamentales, edificios de oficinas), industrial y de transporte. El consumo de electricidad representa la mayor parte del uso de energía en los sectores residencial y comercial. Imagen: cortesía de U.S. Environmental Protection Agency

energéticamente hablando; y estimulando la compra de electrodomésticos y vehículos eficientes.

**Ampliar el uso de fuentes de energía de consumo bajo o consumo cero de carbono**, por ejemplo, cambiando de carbón y petróleo a gas natural, ampliando el uso de energía atómica y fuentes renovables de energía, tales como la solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica y biomasa; capturando y secuestrando el CO<sub>2</sub> de fábricas y plantas generadoras de energía.

**Capturar y secuestrar el CO<sub>2</sub> directamente de la atmósfera**, por ejemplo, manejando bosques y suelos para mejorar la captura de carbono; desarrollando métodos mecánicos para lavar el CO<sub>2</sub> directamente del aire circundante.

Desarrollar estas oportunidades para reducir las emisiones dependerá en gran manera de las inversiones del sector privado y de las elecciones de comportamiento y consumo de los particulares.

Los gobiernos, en sus tres órdenes (federal, estatal y municipal), juegan un importante papel al buscar influir entre los principales interesados mediante políticas efectivas e incentivos. En general, hay cuatro arcones de herramientas primordiales de las cuales elegir políticas para orientar la reducción de emisiones:

- Fijación de precios para las emisiones, por ejemplo, mediante un impuesto al carbono o un sistema de "tope y canje";<sup>6</sup>
- mandatos o regulaciones que pueden incluir controles directos sobre las emisiones (por ejemplo, mediante la Ley de Aire Limpio), o mandatos tales como los estándares sobre economía automotriz de combustible, requisitos de etiquetamiento, códigos de construcción, así como estándares para la cartera de la generación de energía renovable o baja en carbono;
- subsidios públicos sobre la elección de opciones para la reducción de emisiones mediante el código fiscal, créditos o apropiaciones, o garantías de préstamos; y
- proporcionar información y educación, y promoviendo medidas voluntarias para la reducción de emisiones.

Un programa nacional exhaustivo usaría probablemente instrumentos de todas estas áreas. La mayoría de los economistas y analistas de política han concluido, sin embargo, consideran que poner un precio a las emisiones de CO<sub>2</sub>, lo suficientemente elevado e incremental, representa el camino menos costoso para reducir de manera significativa las

<sup>6</sup> Programa de regulación de límites máximos y de comercio para orientar emisiones de gases de efecto invernadero. (N.T.)



FIGURA 33

**Oportunidades Clave para Reducir las Emisiones.** Una cadena de factores determina cuánto CO<sub>2</sub> se acumula en la atmósfera. Se pueden presentar mejores resultados (elipses doradas) si el país se concentra en varias de las oportunidades dentro de cada uno de los cuadros azules. Fuente: Consejo Nacional de Investigación, 2010b.

emisiones; también es el incentivo más eficiente para la innovación y las inversiones de largo plazo necesarias para desarrollar y aplicar tecnologías e infraestructura de eficacia energética y bajo consumo de carbono. Empero, también podrían requerirse políticas complementarias para asegurar un progreso rápido en áreas clave.

### ***Oportunidades para reducir otros agentes causales del calentamiento de origen antrópico***

Existen oportunidades para reducir las emisiones de gases no- $\text{CO}_2$ , tales como metano, óxido nitroso y algunos gases industriales (por ej., hidrofluorocarbonos), que representan al menos 15% de las emisiones de gases con efecto invernadero de los EEUU. Molécula por molécula, estos gases son por lo general agentes forzadores mucho más potentes que el  $\text{CO}_2$ , si bien el dióxido de carbono es el contribuyente más importante del cambio climático en el largo plazo dada su abundancia y largo tiempo de vida.

Algunos gases –que no son  $\text{CO}_2$ – pueden ser reducidos con costos negativos o sobrecostos modestos. Por ejemplo, reducir las fugas de metano de los sistemas de gas y petróleo, minería de carbón y rellenos sanitarios, es costo eficiente, ya que hay un mercado para el gas recuperado. Reducir el

metano también mejora la calidad del aire. La fuente más importante de emisión de gases con efecto invernadero no  $\text{CO}_2$  es la agricultura, en particular el metano producido al digerir el ganado sus alimentos, así como el metano y óxido nitroso producidos por el estiércol y los fertilizantes nitrogenados. Estas emisiones pueden ser reducidas de muchas formas, incluyendo el empleo de técnicas de “agricultura de precisión”, que ayudan a los granjeros a minimizar las prácticas de fertilización excesiva que generan estas emisiones, así como mediante la mejora de los sistemas de tratamiento de desechos animales.

Algunos contaminantes de vida corta, que no son gases con efecto invernadero, también producen calentamiento. Un ejemplo es el hollín, emitido por la quema de combustible fósil, biocombustibles y biomasa (por ejemplo, el estiércol empleado en muchos países en desarrollo para cocinar). Donde se produce, el hollín puede causar fuerte calentamiento atmosférico local o regional. También puede amplificar el calentamiento en algunas regiones al dejar una cubierta negra, absorbente de calor, sobre superficies que, de otra forma, serían reflejantes, tales como los hielos y nieve del Ártico. La reducción de estos agentes térmicos de vida corta podría ayudar a reducir el cambio climático en el corto plazo.

## **¿Cuáles son las alternativas de preparación ante los impactos del cambio climático?**

**S**i bien se encuentran en desarrollo en un número de Estados, países y comunidades, los esfuerzos encaminados a la planificación y respuesta para la adaptación [ante el cambio climático], mucha de la experiencia nacional [de los EEUU] sobre la protección de sus ciudadanos, recursos e infraestructura, está basada en registros históricos de variabilidad climática durante periodos de relativa estabilidad climática. La adaptación al cambio climático requiere un paradigma diferente; uno que considere una serie de condiciones climáticas futuras posibles y sus impactos asociados, algunos de ellos más allá de la esfera de experiencias pasadas.



Los esfuerzos encaminados a la adaptación se ven entorpecidos por la falta de información sólida sobre los beneficios, costos, así como el potencial y limitaciones de las diferentes respuestas. Ello se debe en parte a la diversidad de impactos y vulnerabilidades a través de todos los Estados Unidos y el acervo, relativamente limitado, de investigaciones enfocadas hacia acciones de adaptación al cambio climático. En el corto plazo, las acciones de adaptación más fácilmente desplegables incluyen estrategias de bajo costo, que ofrecen beneficios colaterales de corto plazo, así como acciones que revierten políticas y prácticas mal adaptadas. En un

Impacto	Posible acción de adaptación	Federal	Estatal	Gobierno local	Sector privado	ONG/individuo
Inundación gradual de las tierras bajas, pérdida de hábitat costeros, particularmente humedales costeros; intrusión del agua salada en acuíferos costeros y ríos; incremento en la erosión de la zona costera y pérdida de islas de barrera; cambios en las condiciones de navegación	Coloque y diseñe todas las obras públicas futuras para tomar los incrementos del nivel del mar en consideración	■	■	■		
	Eliminar los subsidios públicos de desarrollo en áreas de alto riesgo en la zona de costa	■	■			
	Desarrollar sólidos, bien planificados, planes/programas de alejamiento de la costa o reubicación		■	■		
	Proteger la infraestructura pública (sistemas de tratamiento de aguas servidas/aguas de tormenta, plantas productoras de energía, carreteras, calzadas, puertos, puentes, etcétera)	■	■	■		
	Aprovechar líneas de costa naturales, linderos y zonas de amortiguamiento para permitir el desplazamiento con el tiempo hacia el interior del hábitat costero e islas de barrera (por ejemplo, dunas y barreras arboladas).	■	■	■		■
	Estimular alternativas de "reforzamiento" de la línea costera mediante "líneas de costa vivientes".	■	■	■	■	

**Tabla 1. Ejemplos de algunas opciones de adaptación para uno de los escenarios de incremento del nivel del mar.**

plazo más largo, podrían requerirse respuestas más costosas y dramáticas. La Tabla 1 proporciona algunos ejemplos de acciones de corto plazo que podrían ser consideradas para abordar algunos de los impactos esperados por el incremento del nivel del mar.

Si bien aún persisten factores de incertidumbre en relación con la naturaleza exacta y la magnitud de los impactos del cambio climático, una movilización en estos momentos con miras a incrementar la capacidad adaptativa de la nación puede ser considerada como una póliza de seguros en contra de los riesgos del cambio climático. El gobierno federal puede desempeñar un papel significativo como catalizador y coordinador de iniciativas

locales y regionales al proporcionar recursos técnicos y científicos, incentivos para dar comienzo a la planificación adaptativa, orientaciones transversales entre jurisdicciones, así como una plataforma para compartir las lecciones aprendidas y brindar apoyo a la investigación científica para ampliar conocimientos acerca de los impactos y la adaptación. Adicionalmente a los impactos directos del cambio climático, los Estados Unidos pueden verse afectados indirectamente por los impactos del cambio climático que se suceden en otras partes del mundo. Por ello, es del interés del país ayudar a elevar la capacidad de adaptación de otras naciones, especialmente los países en desarrollo, que carecen de recursos y experiencia.

## ¿Por qué se requieren acciones ante la incertidumbre aún existente sobre los riesgos del cambio climático?

Investigaciones adicionales nunca borrarán por completo las incertidumbres acerca del cambio climático y sus riesgos dadas las complejidades inherentes al sistema climático y la multiplicidad de factores conductuales, económicos y técnicos difíciles de proyectar al futuro. Sin embargo, la incertidumbre no es razón para la inactividad, y existen muchas cosas que ya sabemos acerca del cambio climático sobre las que podemos actuar. Entre las razones para dar comienzo a la acción, se encuentran las siguientes:

- Mientras más rápido se proceda a realizar esfuerzos serios en favor de la reducción de emisiones de gases

con efecto invernadero, más bajos serán los riesgos planteados por el cambio climático y menor presión habrá por llevar a cabo más adelante reducciones mayores, más rápidas y potencialmente más caras.

- Algunos de los impactos del cambio climático, una vez que se hayan manifestado, persistirán durante cientos y aun miles de años, y serán difíciles o imposibles de "deshacer". Por el contrario, muchas de las acciones tomadas en respuesta al cambio climático, podrían ser revertidas o reducidas si se llegase a demostrar que son más estrictas de lo que, de hecho, se requiere.



- Alrededor del mundo, cada día se están llevando a cabo considerables inversiones en equipo e infraestructura que podrían “amarrar” compromisos para seguir produciendo durante muchas décadas más emisiones de gases con efecto invernadero. Posicionar políticas e incentivos relevantes en este momento proporcionará orientaciones cruciales para tomar decisiones acerca de estas inversiones.
- Muchas de las acciones que pueden ser tomadas para reducir la vulnerabilidad ante los impactos del cambio climático representan inversiones de

sentido común que también ofrecerán protección en contra de variaciones normales del clima y eventos meteorológicos extraordinarios.

El reto para las sociedades consiste en sopesar los riesgos y beneficios, y tomar decisiones sensatas, aun a sabiendas de que existen incertidumbres, como de hecho se hace en tantos otros contextos como, por ejemplo, cuando las personas compran un seguro de vivienda. Un marco de referencia valioso para apoyar las decisiones sobre el cambio climático es un enfoque de **análisis de riesgo reiterativo**. Esto hace referencia a un proceso sistemático de identificación de riesgos y de posibles opciones de respuesta; a la promoción de un portafolios de acciones que tiendan a reducir los riesgos ante todo un espectro de posibles futuros; y al ajuste de respuestas en el tiempo para poder sacar provecho de nuevos conocimientos, información y capacidades tecnológicas.

## Conclusión

**R**esponder ante el cambio climático consiste en tomar decisiones de cara al riesgo. Cualquier curso de acción lleva consigo riesgos potenciales y costos, pero la inacción puede representar el mayor riesgo frente al cambio climático y sus impactos. Las opciones climáticas tomadas en América serán hechas por los funcionarios elegidos,

los líderes empresariales, los individuos, así como otros tomadores de decisión de todo el país; este tipo de decisiones involucrará numerosos juicios de valor más allá de los alcances de la ciencia. Sin embargo, un conocimiento científico robusto y los análisis constituyen un fundamento crucial para fundamentar las decisiones.



## REFERENCIAS

- National Research Council, 2010a, *Advancing the Science of Climate Change*
- National Research Council, 2010b, *Limiting the Magnitude of Climate Change*
- National Research Council, 2010c, *Adapting to the Impacts of Climate Change*
- National Research Council, 2010d, *Informing an Effective Response to Climate Change*
- National Research Council, 2010e, *Ocean Acidification: a National Strategy to Meet the Challenges of a Changing Ocean*
- National Research Council, 2011a, *Climate Stabilization Targets: Emissions, Concentrations, and Impacts for Decades to Millennia*
- National Research Council, 2011c, *America's Climate Choices*

Si desea obtener mayor información, favor de dirigirse al Consejo de Ciencias Atmosféricas y Clima al 202-334-3512 o visite <http://dels.nas.edu/basc>. Un video basado en la Parte I de este folleto se encuentra disponible en <http://americasclimatechoices.org>

Este folleto fue producido por el Consejo Nacional de Investigación con el apoyo de la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA). Fue desarrollado por Nancy Huddleston y diseñado por Francesca Moghari. Se agradecen las contribuciones especiales de Ian Kraucunas, Antonio J. Busalacchi, Jr., Edward J. Dunlea, Robert W. Fri, Lauri Geller, Pamela A. Matson, Damon Matthews, Gerald A. Meehl, Claudia Mengelt, Raymond T. Pierrehumbert, Kimberly Prather, John P. Reisman y Benjamin D. Santer.

### *Créditos de imágenes*


Fotografía de la carátula principal por Michael D. Dudzik; imagen en miniatura de la cubierta (abajo) por Fuse; p. 1 por John P. Kelley (Image Bank); p. 17 por Joe McDonald; p. 19 cortesía del Servicio de Levantamientos Geológicos de los Estados Unidos; p. 20 por Randy Well (Stone); p. 23, p. 27 por David Haines; p.30 Jupiter Images (Comstock); p. 36, kali9.

Fotografía en la p. 2 por Mike Waszkiewicz, cortesía de la Fundación Nacional de Ciencias. Nicole Spaulding y Kristin Schild, estudiantes del Instituto de Cambio Climático de la Universidad de Maine, obtienen fragmentos de hielo próximos a la superficie como parte de las investigaciones sobre nuevos métodos de muestreo del registro de cambio climático en las regiones polares.

©Academia Nacional de Ciencias

## **Acerca del Consejo Nacional de Investigación**

El Consejo Nacional de Investigación fue organizado por la Academia Nacional de la Ciencia en 1916 con la finalidad de relacionar a la amplia comunidad científica y tecnológica con los objetivos de la Academia de promover el conocimiento y asesorar al gobierno federal. El Consejo se ha transformado en la principal agencia operativa tanto de la Academia Nacional de Ciencias como de la Academia Nacional de Ingeniería, y es administrada conjuntamente por ambas academias y el Instituto de Medicina. El Consejo Nacional de Investigación recurre a científicos, ingenieros, profesionales de las ciencias de la salud y otros expertos de renombre, para servir en comités que abordan aspectos científicos y técnicos en algunos de los problemas nacionales más apremiantes. Estos expertos sirven a título gratuito y son evaluados para evitar conflictos de interés y asegurar que el comité está en capacidad de aportar consejo imparcial y objetivo. Mediante estos comités, las academias preparan cerca de 200 informes revisados colegiadamente que proporcionan análisis concienzudos y orientaciones valiosas para los generadores de políticas e interesados directos.



**¿Cómo sabemos que la Tierra se ha calentado? ¿Cómo sabemos que los seres humanos están causando el incremento de las concentraciones en los gases de efecto invernadero? ¿Cómo sabemos que la actual tendencia al calentamiento no es causada por el Sol? ¿Cómo sabemos que la tendencia al calentamiento no es causada por ciclos naturales? ¿Cuánto calentamiento más podemos esperar? ¿Cómo se espera que se modifiquen las precipitaciones? ¿Cómo se verán afectados los hielos oceánicos y la nieve? ¿Cómo se verán afectadas las zonas costeras? ¿Cómo se verán afectados los ecosistemas? ¿Cómo se verán afectadas la agricultura y la producción de alimento? ¿Cómo sustenta la ciencia las respuestas ante el cambio climático?**

## **LAS ACADEMIAS NACIONALES**

*Asesores de la nación en ciencia, ingeniería y medicina*

La nación recurre a las academias nacionales –la Academia Nacional de Ciencias, la Academia Nacional de Ingeniería, el Instituto de Medicina y el Consejo Nacional de la Investigación– en busca de consejo independiente y objetivo sobre los temas que afectan la vida humana a nivel mundial.

[www.national-academies.org](http://www.national-academies.org)