

Cambio climático. Causas y perspectivas de futuro

J. Germán Solé

Durante los últimos años se está produciendo un calentamiento global de nuestro planeta que la mayoría de los científicos asocia a un cambio climático producido en gran medida por la acción del hombre. En este artículo se revisan las evidencias científicas que sostienen esta afirmación, y las proyecciones de los modelos climatológicos, en función de los diferentes escenarios para este siglo.

Un hecho repetido

Una cuestión que parece estar fuera de toda duda es que durante los últimos años el clima está cambiando. El clima no es un elemento estático y presenta variaciones y fluctuaciones en diferentes escalas temporales. Así, durante la historia de nuestro planeta se han producido edades glaciares que han alternado con las épocas más cálidas interglaciares.

La reconstrucción del clima se realiza mediante una gran diversidad de metodados. Por ejemplo, el análisis de las burbujas de aire atrapadas en el hielo de la Antártida permiten conocer las concentraciones de gases atmosféricos de los últimos 400.000 años¹.

¹ SPAHNI *et al.*, 2005, «Atmospheric Methane and Nitrous Oxide of the Late Pleistocene»

Las capas de material dendrítico encontradas en el fondo del Atlántico Norte sugieren una ruptura masiva de hielo con formación de icebergs, conocidas como evento Heinrich². La vegetación en el pasado puede reconstruirse a partir de polen fosilizado.

El clima está influenciado por numerosos factores que a su vez pueden ser de origen natural o antropogénicos. Además hay causas que conlleven un efecto positivo o aumento de la temperatura, como por ejemplo la emisión de gases de efecto invernadero o un aumento de la energía emitida por el sol, y otros que implican un descenso de la temperatura como son las emisiones volcánicas y algún tipo de contaminación emitida por el hombre que reflejan la radiación proveniente del sol. Si se altera el equilibrio entre los factores positivos y negativos, la consecuencia será un cambio en el clima de la Tierra. El forzamiento radiativo es una medida de la influencia que un factor tiene para alterar el balance de energía entrante y saliente en el sistema Tierra-atmósfera.

El organismo internacional que aglutina todos los esfuerzos en el estudio

del cambio climático es el IPCC³. Este organismo fue constituido en 1988 bajo los auspicios del Programa Medioambiental de las Naciones Unidas y la Organización Meteorológica Mundial. La pertenencia al IPCC está abierta a todos los países miembros de la ONU y de la OMM.

En términos del IPCC, la expresión cambio climático se refiere a cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo, bien sea debido a la variabilidad natural o como consecuencia de la actividad humana. En este sentido difiere del que se define en Framework Convention on Climate Change en el que término cambio climático hacía referencia únicamente al de origen antropogénico.

A lo largo del tiempo los informes que ha producido el IPCC evolucionan en la medida que avanzan los estudios sobre el cambio del clima y las series de datos se alargan. Así en el informe de 1990 se decía que no se podía afirmar si el incremento de 0,5 °C producido en la temperatura media de planeta en los últimos cien años estaba causado por la actividad humana. En 1995 se concluye que el conjunto de evidencias sugiere una cierta influencia humana en el conjunto del clima.

Como se ve, en cinco años ya empezó a introducirse la hipótesis de que el hombre tiene responsabilidad en los

ne from Antarctic Ice Cores», *Science* 310: 1317-1321.

² H. HEINRICH, 1988, «Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years», *Quaternary Research* 29:142-152.

³ De las siglas en inglés Intergovernmental Panel on Climate Change.

cambios observados. En el informe de síntesis del IPCC, y en particular en el resumen para responsables de políticas del tercer informe de evaluación (IPCC 2001), se afirma: «*El sistema climático del planeta ha cambiado de manera importante a escala nacional y mundial desde la época preindustrial, y algunos de estos cambios se pueden atribuir a actividades humanas (...) Existen pruebas nuevas y más convincentes de que la mayor parte del calentamiento observado durante los últimos cincuenta años se puede atribuir a actividades humanas*».

La misión del IPCC es evaluar de forma abierta, transparente, objetiva y comprensiva la información científica, técnica y socio-económica relevante respecto al conocimiento de las bases científicas del riesgo de cambio climático inducido por el hombre, sus potenciales impactos y opciones acerca de la adaptación y su mitigación. El IPCC no lleva a cabo investigación ni monitoriza datos relacionados con el clima u otros parámetros relevantes. Fundamenta su evaluación principalmente en trabajos científicos y técnicos publicados en revistas científicas.

La detección del cambio climático se basa en demostrar que el clima ha cambiado en algún aspecto estadístico definido sin atribuir una razón para dicho cambio. El discernir los orígenes del cambio se basa en el proceso de establecer las causas más probables del cambio con unos niveles de confianza. Como no podemos dis-

poner de un laboratorio como la Tierra para poder realizar experimentos, la atribución a causas antropogénicas del cambio climático debe basarse en: cambio constatado del clima, demostración de que el cambio es consistente con los modelos numéricos en los

*existen métodos que permiten
identificar el origen
(natural o antropogénico)
de los cambios climáticos
observados*

que se introduce el forzamiento radiactivo producido por el hombre y que no hay fenómenos naturales alternativos que expliquen el cambio observado⁴.

El efecto invernadero

De forma resumida, el mecanismo que explica el calentamiento global

⁴ R. SOMERVILLE *et al.*, 2007, «Historical Overview of Climate Change», en *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Acceso on-line: 25/04/2007 <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>

de la Tierra se basa en el hecho de que desde la revolución industrial, las emisiones de gases que producen efecto invernadero ha ido en constante aumento.

Podemos considerar el Sol como un emisor de energía en onda corta. La energía proveniente del sol que no es absorbida por la alta atmósfera (ionosfera, ozonosfera...), llega a la superficie terrestre y la calienta. Como cualquier otro cuerpo que esté a una temperatura superior a los 0° K, la superficie de la Tierra emite energía en forma de radiación de onda larga. Una parte de esta radiación no vuelve al espacio, sino que es absorbida en la atmósfera mediante los gases de efecto invernadero. Estos gases (vapor de agua, H₂O; dióxido de carbono, CO₂; metano, CH₄; óxidos de nitrógeno, NO_x; ozono, O₃; ...) absorben los fotones infrarrojos emitidos por el suelo.

La energía de esos fotones no basta para causar reacciones químicas, sino que simplemente aumenta la energía de rotación y de vibración de las moléculas implicadas. El exceso de energía es luego transferido a otras moléculas por las colisiones moleculares, en forma de energía cinética, es decir, de calor, aumentando la temperatura del aire.

De la misma forma, la atmósfera se enfría emitiendo energía infrarroja cuando se producen las correspon-

dientes transiciones de estado vibracional y rotacional en las moléculas hacia niveles menores de energía. El hecho de que esas transiciones requieran cambios en el momento dipolar de las moléculas implica que los dos principales gases que constituyen la atmósfera (nitrógeno, N₂, y oxígeno, O₂) no contribuyan al efecto invernadero al no tener momento dipolar, puesto que están formados por dos átomos iguales.

La mayoría de los gases de efecto invernadero existen de forma natural en la atmósfera. Los clorofluorocarburos (CFC), que también contribuyen al efecto invernadero, son de origen antropogénico, siendo además los responsables de la destrucción del ozono estratosférico. Como vemos, este hecho es el responsable de que la temperatura del planeta sea superior a la que tendríamos si no existiesen estos gases. Por tanto, la presencia de gases que producen el efecto invernadero, en principio es beneficiosa e incluso necesaria para el desarrollo de la vida tal como la conocemos.

Evidencias del calentamiento global

Uno de los principales problemas en el estudio de la variabilidad climática es el poder separar los cambios naturales de los producidos por el hombre. Existen métodos que permiten

Cambio climático. Causas y perspectivas de futuro

identificar el origen de los cambios observados.

En primer lugar tenemos el aumento de la concentración del dióxido de carbono atmosférico. Como se ha mencionado anteriormente, desde la revolución industrial, la emisión de estos gases, en particular el dióxido de carbono y los óxidos de nitrógeno, ha ido en constante aumento, debido principalmente al uso de combustibles fósiles para la generación de energía y transporte, modificándose sustancialmente la proporción de estos gases en la atmósfera, con lo que se produce un aumento del calor absorbido en la atmósfera y que no es-

capa al espacio. Además hay que tener en cuenta otros fenómenos como, por ejemplo, la deforestación que limita la capacidad de eliminación de CO_2 .

El estudio de las burbujas de aire atrapadas en el hielo de la Antártida permite retroceder en el conocimiento del contenido del CO_2 presente en la atmósfera y la temperatura hasta unos 400.000 años.

En la figura 1 se presenta la comparación de la serie de la concentración de CO_2 atmosférico y el cambio de la temperatura deducidos a partir de los sondeos en el hielo en la Antárti-

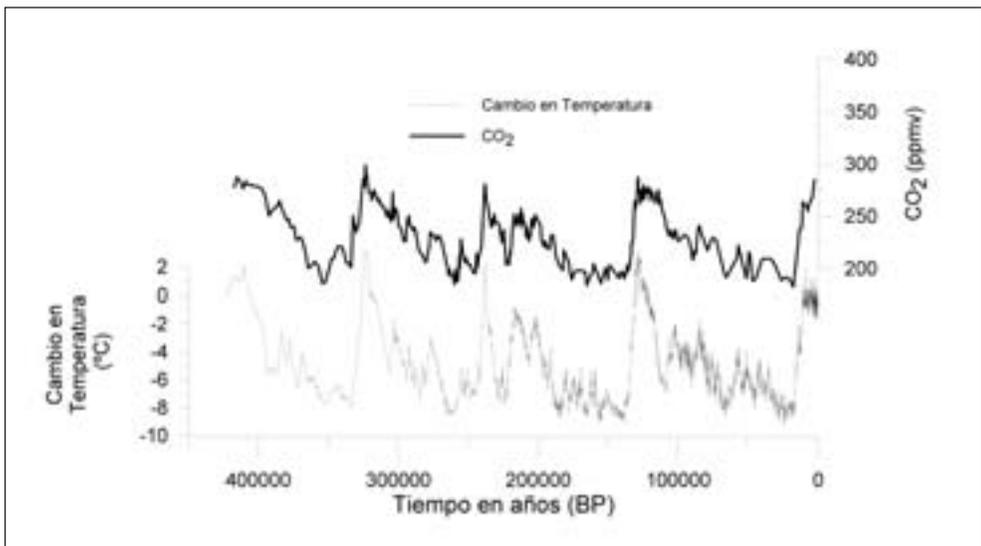


FIGURA 1.— CO_2 y temperatura a partir de los datos de los sondeos de hielo en la Antártida⁵

⁵ JOUZEL, *et al.*, 1987, 1993, 1996, *Petit et al* 1999. Datos tomados del Oak Ridge National Laboratory (<http://cdiac.ornl.gov/>).

da. Como se ve, las dos series muestran fluctuaciones prácticamente análogas. Durante todos estos años las concentraciones de CO₂ variaron aproximadamente entre las 180 y las 280 ppmv (partes por millón en volumen). A partir de 1800, con el inicio de la revolución industrial la concentración del CO₂ atmosférico ha ido creciendo de forma espectacular llegando a alcanzar las 376 ppmv.

Medidas simultáneas en diferentes zonas del planeta presentan prácticamente los mismos valores para el CO₂. En la figura 2 se presenta el valor anual de la concentración de CO₂ atmosférico en tres estaciones: Christmas Island, La Jolla Pier en Califor-

nia y Mauna Loa en Hawai. Como se ve, los valores son prácticamente iguales y su ritmo de crecimiento también, por lo que en principio no parece razonable hablar de medidas locales sino que reflejan un valor global de la concentración del CO₂ atmosférico. En el caso de las medidas realizadas en la estación de Mauna Loa, el ajuste mínimo cuadrático de los datos muestra una tendencia positiva de 1.4 ppmv/año. Los datos han sido tomados del Oak Ridge National Laboratory.

La siguiente cuestión es intentar discernir qué parte de este CO₂ es de origen natural y qué parte proviene de la utilización de combustibles fósiles

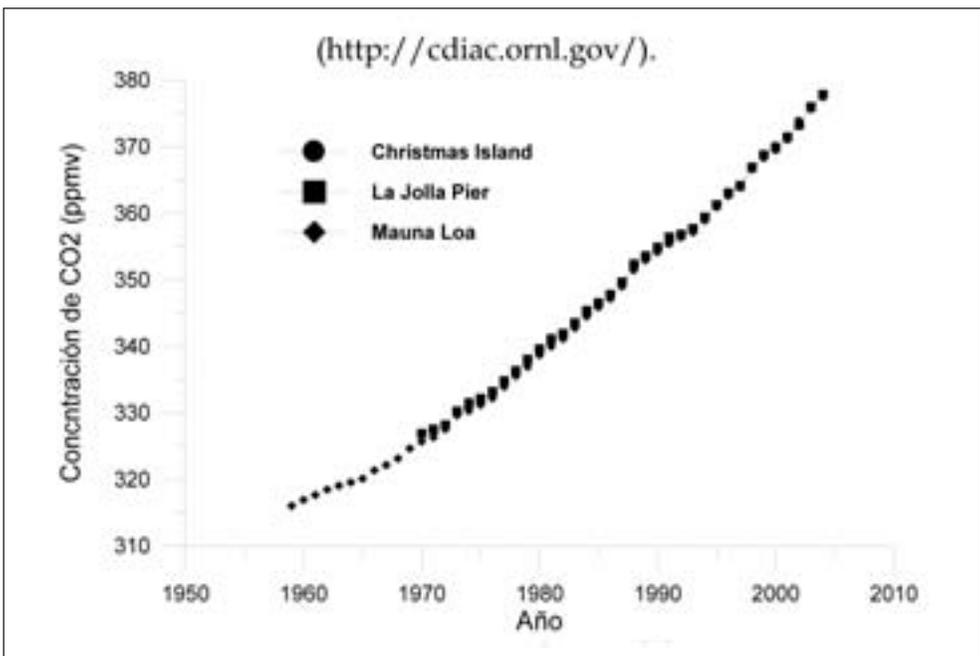


FIGURA 2.—Evolución de la concentración media anual de CO₂ en tres estaciones

(carbón, petróleo, ...). La respuesta puede estar en el estudio de los isótopos del carbono, en particular los isótopos C-12, C-13 y C-14. El isótopo C-12 es el predominante, tiene seis neutrones y es estable. El isótopo C-13 también es estable, pero las plantas prefieren el C-12 con lo que el carbono fotosintético tendrá menos cantidad de C-13 que el proveniente, por ejemplo, de la respiración animal. El C-14 es radioactivo. Las observaciones muestran que existe un descenso simultáneo de las proporciones C-14/C-12 y C-13/C-12, mientras que el CO₂ total aumenta. Suess en 1955 demostró que los combustibles fósiles no contienen C-14 por ser muy antiguos y éste ya se ha desintegrado. Por otra parte, el carbono de los combustibles fósiles es carbono fotosintético, con lo que predomina el C-12. Si el aumento del CO₂ proviniese del calentamiento de los océanos y la consecuente liberación de CO₂, no deberían observarse estas disminuciones.

Análogamente la concentración de metano ha aumentado desde la era preindustrial hasta nuestros días, pasando de 715 a 1732 ppb a principios de los noventa, siendo su concentración en el 2005 de 1774 ppb. También los óxidos de nitrógeno han pasado de 270 ppb como valor de la época preindustrial a 319 ppb en el año 2005.

Otro punto que evidencia el calentamiento global es el hecho de que ha

habido un calentamiento de los océanos. Los océanos han absorbido del orden de veinte veces más calor que la atmósfera a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, alcanzando mayores temperaturas no sólo en las aguas superficiales, sino también a profundidades de unos 500 m. Observaciones desde 1961 muestran que

*desde el inicio de la
revolución industrial (1800),
la concentración de CO₂
atmosférico ha ido creciendo
de forma espectacular*

la media de temperatura global del océano ha aumentado hasta profundidades de 3000 m. Los océanos han absorbido más del 80% del calor introducido en el sistema climático. Este calentamiento provoca que el agua se dilate contribuyendo al aumento del nivel del mar.

En la recientemente aprobada contribución del grupo de trabajo I del IPCC ⁶ se afirma: el conocimiento de las influencias del calentamiento antropogénico y enfriamiento sobre el clima ha mejorado desde el tercer informe de evaluación del IPCC (2001),

⁶ «Climate change 2007: The physical science basis».

pasando a ser de muy alta confianza (al menos 9 sobre 10). El efecto neto medio de la actividad humana desde 1750 ha sido de calentamiento, con un forzamiento radiativo de +1.6 [entre +0.6 y +2.4] $W m^{-2}$. Los términos que contribuyen a este efecto neto son los siguientes: el efecto combinado del incremento de dióxido de carbono, metano y óxido de nitrógeno es +2.30 [entre +2.07 y +2.53] $W m^{-2}$, que muy probablemente es un valor im-

los océanos han absorbido del orden de veinte veces más calor que la atmósfera a lo largo de la segunda mitad del siglo XX

precedente en los últimos 10.000 años. El forzamiento radiativo debido al CO_2 aumentó un 20% entre 1995 y 2005. Las contribuciones antropogénicas a los aerosoles, y el albedo de las nubes, que provocan un efecto neto de enfriamiento son respectivamente de 0.5 [entre -0.9 y -0.1] $W m^{-2}$ y -0.7 [entre -1.8 y -0.3] $W m^{-2}$.

Existen otras contribuciones antropogénicas significativas al forzamiento radiativo. Así, los cambios en el ozono troposférico debido a la emisión de precursores del ozono contribuye con +0.35 [entre +0.25 y +0.65] $W m^{-2}$.

Los halocarbonos también ayudan con un factor +0.34 [entre +0.31 y +0.37] $W m^{-2}$. Los cambios en el albedo de la superficie debido al cambio en la cobertura de la tierra (deforestación, por ejemplo) o la deposición de aerosoles negros procedentes del carbón sobre la nieve implican términos de -0.2 [-0.4 to 0.0] +0.1 [0.0 to +0.2] $W m^{-2}$. Se estima que los cambios en la irradianza solar desde 1750 causan un forzamiento radiativo de +0.12 [entre +0.06 y +0.30] $W m^{-2}$, que es menos de la mitad del estimado en el Tercer informe de Evaluación (IPCC 2001).

Once de los doce últimos años (1995–2006) están entre los doce más cálidos desde 1850. La tendencia lineal de calentamiento de los últimos cincuenta años (0.13 [entre 0.10 y 0.16] $^{\circ}C$ por década) es prácticamente el doble que en los últimos cien años. Se considera que el efecto de isla urbana de calor es real, pero o bien es muy local o bien es despreciable sobre la tierra y nulo sobre el océano.

Nuevos análisis de la temperatura de la baja y media troposfera usando globos, cohetes y satélites, muestran velocidades de calentamiento similares a los de la superficie y son consistentes con sus respectivas incertidumbres, reduciendo la discrepancia que se apreciaba en el tercer informe de evaluación.

La media del vapor de agua atmosférico ha aumentado desde al menos

1989 tanto sobre la tierra como en los océanos y en la alta troposfera. Este hecho es consistente con que el aire más caliente tiene mayor capacidad para retener el vapor de agua.

Los glaciares de las montañas y la cobertura de nieve han disminuido en valor medio en ambos hemisferios. Nuevos datos desde el Tercer Informe de Evaluación (IPCC 2001) muestran que la pérdida de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida ha contribuido muy probablemente al aumento del nivel del mar entre 1993 y 2003.

El nivel medio global del nivel del mar se elevó a una velocidad media de 1.8 [entre 1.3 y 2.3] mm por año entre 1961 y 2003. Esta velocidad fue mayor entre 1993 y 2003, alrededor de 3.1 [entre 2.4 y 3.8] mm por año. Si esta mayor velocidad entre 1993 y 2003 es consecuencia de una variación decadal o refleja una tendencia a largo plazo es una cuestión que todavía está por resolver.

Estimaciones para el futuro

Las predicciones para este siglo se recogen en el capítulo 10 de la contribución del grupo de trabajo I del IPCC⁷ que ha sido presentada muy recientemente y que constituirá, con las apor-

taciones de los otros grupos, el cuarto informe de evaluación, que se espera salga a la luz a finales de año.

Para elaborar las proyecciones futuras se han utilizado diecinueve modelos globales, todos ellos con mejores aproximaciones a los procesos físico-químicos, y mayor resolución espacial que los de la generación precedente. Otro aspecto fundamental para efectuar las proyecciones es definir bajo qué escenarios se desarrollará la evolución. Los escenarios son imágenes del futuro, no son predicciones, sino más bien una imagen alternativa de cómo se desarrollará el futuro. En cada escenario se estiman muchas variables, como por ejemplo el ritmo de emisión de gases de efecto invernadero, el cambio demográfico y sus necesidades energéticas, el desarrollo social y económico, el cambio tecnológico, el uso de los recursos o la gestión de la contaminación, entre otros (IPCC 2000).

Temperatura media. Todos los modelos evaluados en el citado capítulo son para escenarios sin mitigación, y proyectan aumentos en la media global de la temperatura superficial a lo largo del siglo XXI, producidos principalmente por el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero emitidos por el hombre. La media del calentamiento de los diferentes modelos entre los años 2011 y 2030 varía entre +0.64 °C y +0.69 °C. La elección del escenario ya es más

⁷ «Climate change 2007: The physical science basis» (MEEHL *et al.*, 2007).

crítica para la mitad del siglo con valores que oscilan entre $+1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Temperaturas extremas. Es muy probable que las olas de calor sean más intensas, más frecuentes y de mayor duración. Las proyecciones para los episodios fríos apuntan a que éstos

*once de los doce últimos
años (1995–2006) están
entre los doce más cálidos
desde 1850*

disminuirán significativamente. En general las temperaturas mínimas crecerán más rápidamente que las máximas, con lo que se tendrá una reducción en el rango de temperaturas diurno.

Precipitación media. La actual generación de modelos indica un aumento de la precipitación en áreas tropicales de precipitación máxima (monzones) y el Pacífico tropical, con una disminución generalizada en las zonas subtropicales y aumentos a altas latitudes. Los episodios de precipitación intensa aumentarán, en particular en los trópicos y a altas latitudes. En las zonas en las que las precipitaciones medias decrezcan, se espera que la intensidad de la preci-

pitación aumente, si bien habrá largos períodos sin precipitación.

Nieve y hielo. Al aumentar las temperaturas, la cobertura de nieve y hielo tiende a disminuir. En los glaciares predomina la fusión estival a la acumulación invernal. Esto contribuirá al aumento del nivel del mar. Los modelos indican una reducción de los mares de hielo tanto en el Ártico como en la Antártida, siendo la reducción más acelerada en el primero. Algunos modelos indican que la capa de hielo del Ártico podría desaparecer en verano a finales de siglo.

Ciclo del carbono. Los modelos que acoplan el clima y el carbono, en escenarios de emisión, indican de forma unánime que se reducirá la eficiencia del sistema terrestre para absorber CO_2 antropogénico.

Acidificación de los océanos. Al aumentar las concentraciones de CO_2 atmosférico habrá un aumento de la acidificación de la superficie de los océanos. Las proyecciones de los modelos, dependiendo del escenario escogido, indican una reducción del pH entre 0.14 y 0.35 unidades en el siglo XXI, que se añadirán a las 0.1 unidades que ya se ha reducido desde la época preindustrial

Nivel del mar. El aumento del nivel del mar previsto por los modelos depende enormemente del escenario considerado. Puede variar entre los

0.18–0.38 m, hasta 0.26–0.59 m. Los rangos son menores que los dados en el Tercer Informe de Evaluación (IPCC 2001) debido a que se ha avanzado en el conocimiento de algunas incertidumbres. En todos los escenarios la velocidad media de aumento durante el siglo XXI muy probablemente excederá la velocidad media entre 1961 y 2003 (1.8 ± 0.5 mm año⁻¹). La principal contribución al aumento del nivel del mar es la expansión termal que contribuye entre el 70 y el 75% del valor central estimado en estas proyecciones para todos los escenarios

Los modelos de circulación general indican que la capa de hielo en la Antártida recibirá más precipitación en forma de nieve sin experimentar un sustancial aumento en la fusión superficial, con lo que contribuirán negativamente al aumento del nivel del mar.

Ciclones tropicales (huracanes y tifones). Los resultados de modelos que integran alta resolución y modelos globales indican un probable aumento en los picos de intensidad de viento. Estudios de modelos recientemente publicados investigando la frecuencia de tormentas tropicales simulan una disminución en el número global de tormentas, aunque su confianza estadística no es muy alta, así como en la proyección de un descenso de las tormentas más débiles con un incremento de los ciclones tropicales intensos. Las predicciones de los modelos

muestran un menor número de tormentas a medias latitudes, promediando ambos hemisferios.

Conclusiones

El clima está cambiando a nivel global en los últimos años. La causa más plausible es el aumento de la concentración de gases que producen efecto invernadero desde la época preindustrial hasta nuestros días. Principalmente se atribuye este aumento a la actividad antropogénica.

Además del grupo que se dedica a la evaluación de los forzamientos tanto

*en general, se prevé
que las temperaturas
mínimas crecerán
más rápidamente que
las máximas*

naturales como antropogénicos, al estudio de las tendencias del clima y a las predicciones para el futuro, existen otros dos grupos dentro del IPCC que se dedican a la evaluación de los impactos y a la mitigación. No se ha entrado a valorar en este trabajo los impactos socio-económicos que tendrá el cambio climático ni cuáles son las medidas para su mitigación. No

obstante, parece claro que además de las soluciones científicas que puedan aportarse, la concienciación de todos en el ahorro de energía y en apuestas por el uso de energías alternativas, ayudaría al menos a no aumentar el que puede ser uno de los mayores problemas que afronte la humanidad.

Finalmente, conviene resaltar que, si bien las tesis del IPCC están aceptadas por la mayoría de la comunidad científica, existen autores que tienen serias dudas de que el cambio climático sea un efecto del hombre. Por ejemplo, se cuestionan las proyecciones hechas al considerar que la concentración de CO₂ atmosférico se doble, debido a que el impacto de una unidad de CO₂

emitida es menor que la de su predecesora. También se indica que en numerosas ocasiones las predicciones de los modelos sobrestiman los resultados encontrados y que los modelos no reflejan correctamente la realidad, o que las series instrumentales son muy cortas a escala climática.

Todas estas críticas deben servir para que la comunidad científica ejerza un mayor esfuerzo para mejorar el conocimiento de la realidad del sistema Tierra-atmósfera y del balance energético que en él se produce. Cuanto mejores y más realistas sean los modelos y más largas sean las series temporales de datos, mejores evaluaciones podremos efectuar. ■