



DETECCIÓN Y ATRIBUCIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO A ESCALA REGIONAL

Víctor Orlando Magaña Rueda^[1]
y Luis Manuel Galván Ortiz^[2]

De acuerdo con diversos estudios científicos, la tendencia de la temperatura global del último siglo y medio sólo puede ser explicada si se considera la influencia de las actividades humanas —como la creciente emisión de gases de efecto invernadero (GEI) desde mediados del siglo XIX y los cambios de uso de suelo—, sin embargo, llegar a tal conclusión requirió que el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) realizara no sólo análisis de detección de la tendencia del clima usando registros instrumentales y estimaciones indirectas de la temperatura, sino también ejercicios de atribución que explicaran dichos cambios como resultado de la influencia humana.

Mostrar que un evento meteorológico o climático particular es producto del cambio climático no es sencillo y requiere, con frecuencia, de conocimiento de dinámica del clima y manejo de modelos avanzados.

Palabras clave: cambio climático, clima.

The tendency of the global temperature of the last century can be only explained whether the influence of human activities is considered, such as: the growing emission of greenhouse gases (GHG) since the middle of the nineteenth-century and the changes on the land use, according to diverse scientific studies. Nevertheless, to infer such conclusion, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) carried out not only analysis on detection of the climate tendency, by the use of instrumental registers and indirect estimations of the temperature, but also did exercises on attribution that could explain such changes as a consequence of the human influence.

To affirm that a particular weather or climatic event is consequence of climate change is not simple, and it often requires the use of advanced models and knowledge on climate dynamics.

Key words: climate change, climate.

[1] Doctor en Ciencias Atmosféricas, investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera y profesor de la UNAM. Miembro del SNI. Apoyó el desarrollo del Sistema de Alerta Temprana frente a Huracanes; miembro del comité del Centro Nacional de Prevención de Desastres y parte del Climate Variability Program; Editor asociado de la Revista Atmósfera, de la Revista Brasileira de Meteorología y del Journal of Geophysical Research; jefe del Programa Transversal de Cambio Climático y es parte del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (victormr@servidor.unam.mx).

[2] Licenciado en Geografía y Profesor de Climatología de la UNAM, ha participado en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota del Instituto de Geografía y en el Grupo de Meteorología Tropical del Centro de Ciencias de la Atmósfera. Trabaja en la detección y atribución de cambio climático, variabilidad climática, impactos de fenómenos naturales, análisis de imágenes satelitales y cartografía en general (cohuatl09@yahoo.com.mx).

Tiempo y clima

Constantemente se cae en la equivocación de confundir tiempo meteorológico con clima y, por ello, se habla de manera imprecisa de lo que es cambio climático. Basta leer declaraciones sobre el clima o desastres (mal llamados *naturales*) en los diarios para darse cuenta del error conceptual. Cuando algunos climatólogos se ven forzados a diferenciar entre tiempo y clima, es frecuente que digan que tiempo es *corto plazo* mientras que clima se refiere a una duración más larga o al promedio de muchos estados del tiempo.

Edward Lorenz (1917-2008) dijo: "...tiempo es lo que usted tiene; mientras que clima es lo que usted espera..."; implícita en esta observación de Lorenz está la aserción de que mientras el tiempo es determinista, el clima es probabilista.

En Matemáticas, un sistema determinista es uno en el cual el azar no está involucrado en los futuros estados del sistema, es decir, si se conoce el estado actual del mismo, las variables del ambiente y el comportamiento del sistema ante los cambios en los forzantes (las leyes de la Física que lo controlan), entonces el estado futuro de éste se puede predecir sin ningún riesgo de error. Muchas de las predicciones astronómicas son deterministas, siguiendo principios básicos de la Física y, por ello, sabemos con precisión cuándo ocurrirá un eclipse, por ejemplo.

Por otro lado, un algoritmo probabilista (o probabilístico) es el que basa su resultado en la toma de algunas decisiones al azar, de tal forma que, en promedio, obtiene una buena solución al problema planteado para cualquier distribución de los datos de entrada. Contrario a lo que se espera de un algoritmo determinista, en el probabilista una mínima variación en las condiciones iniciales puede llevar a distintas condiciones futuras del clima. ¿Por qué?, porque el clima es un sistema caótico. El trabajo de Edward Lorenz sobre caos determinístico es un estudio seminal para entender cómo se trabaja con el clima hoy en día.

Para explicar su naturaleza caótica, se puede discernir entre la *predecibilidad* del tiempo contra la del clima. Considérese una ecuación para la predicción del tiempo donde se representen los cambios de una variable en el espacio y el tiempo. Las modificaciones a lo largo del tiempo se pueden dividir con dos componentes: una previsible (más

estable) y otra no fácilmente explicable (inestable). Conforme se avanza en la integración, la dinámica de la inestable domina en la ecuación y hace que el error crezca tan rápido (en un plazo de tres a siete días) que no es posible obtener pronósticos útiles en forma determinista más allá de ese plazo. Debido a este límite, cualquier esperanza de hacer una predicción del tiempo a largo plazo (más de dos semanas) será siempre un sueño. Sin embargo, la ecuación de pronóstico también contiene una componente estable, la cual corresponde al clima y con ella se puede hacer un mejor trabajo de predicción. Después de todo, se conocen muy bien los factores que establecen el estado base del clima, como: la energía del Sol, la velocidad de rotación y la masa del planeta, la composición química de la atmósfera y la distribución de los océanos y los continentes. Por ello, la predicción del clima es factible y, dada la mejora significativa en la calidad de los modelos para éste, desde la década pasada se ha vuelto un asunto muy importante. Seguirá siendo muy difícil asegurar si lloverá al mediodía del día siguiente, pero será posible hacer afirmaciones sobre el estado medio de la atmósfera esperado para los próximos meses e, incluso, años.

Una representación del clima va más allá de la simple expresión de un valor medio. Se requiere, también, describir la variabilidad y los rangos de los eventos meteorológicos extremos. Es por ello que, generalmente, se describe al clima en términos de una función de densidad de probabilidades, donde queda representada la probabilidad de que un parámetro se encuentre en un cierto rango.

Detectar o proyectar cambios requiere trabajar con este tipo de funciones y no sólo con los valores medios. El clima puede estar variando si de manera sistemática la variabilidad o la actividad de los eventos extremos presentan una tendencia en una cierta dirección. Por ejemplo, en muchas partes del mundo se han detectado cambios sistemáticos en la actividad de ondas de calor o en la de lluvias intensas (Aguilar *et al.*, 2005; Paterson *et al.*, 2008) como forma de modificaciones en el clima. Los estudios reportados en fechas recientes por el IPCC indican que las influencias humanas en éste no se circunscriben al promedio de las temperaturas sino que abarcan, también, otros aspectos del clima. Observaciones efectuadas en todos los continentes y en la mayoría de los océanos evidencian que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios del clima regional, en particular por un aumento de la temperatura.

Cambio climático

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, así lo evidencian los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, así como el incremento del promedio mundial del nivel del mar. Para el IPCC, el término *cambio climático* denota una modificación en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un periodo prolongado, por lo general cifrado en decenios o en lapsos más largos. Dicha concepción del tema denota toda modificación del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana. Este significado difiere del utilizado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que lo describe como un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que viene a sumarse a la variabilidad climática natural observada en periodos comparables.

El trabajo de grupos como el IPCC incluye, hoy en día, dos líneas de análisis que intentan poner en claro, primero: que el clima está cambiando respecto a lo conocido en el pasado reciente, y segundo: que las causas de tales cambios tienen un origen asociado con la actividad humana y, por lo tanto, no se trata de un proceso natural. En el primer caso hablamos de lo que se conoce como detección de señales de cambio climático; en el segundo, de atribución.

Así, la detección de cambio climático es el proceso de demostrar que una modificación observada es significativamente importante (desde el punto de vista estadístico) respecto a que se considera parte de la variabilidad natural del clima. Por otro lado, la atribución es el proceso de establecer las relaciones de causa y efecto con cierto grado definido de confianza, incluida la evaluación de hipótesis concurrentes.

La respuesta a los cambios de origen antropógeno se producen en un entorno de variabilidad climática natural sometida a forzamientos internos y externos. Por ello, cualquier análisis de detección o atribución de cambio climático requiere un adecuado conocimiento de la variabilidad climática interna (la no forzada por agentes externos) en todas las escalas temporales, desde semanas hasta siglos e, incluso, milenios.

Las variaciones climáticas forzadas de manera externa pueden deberse a modificaciones en la radiación solar, los aerosoles de origen volcánico o a cambios en los agentes de forzamiento antropógenos, como un aumento de las concentraciones de GEI o aerosoles. La presencia de la variabilidad natural del clima significa que la detección y la atribución de los cambios climáticos de origen antrópico es un problema de distinguir la *señal del ruido*. Los estudios de detección permiten establecer si un cambio observado es o no muy raro desde el punto de vista estadístico, pero ello no significa, necesariamente, que esta aproximación nos permita comprender sus causas. La atribución del cambio climático a factores antropógenos requiere un análisis estadístico-dinámico y la evaluación cuidadosa de diversas pruebas para demostrar, dentro de un margen de error predeterminado, que:

- Es improbable que los cambios observados sean causados de manera íntegra por la variabilidad interna.
- Los cambios son congruentes con las respuestas estimadas a una determinada combinación de forzamientos antrópicos y naturales.
- Los cambios no concuerdan con otras explicaciones físicamente factibles del cambio climático reciente que excluyen elementos importantes de la combinación de forzamientos externos en cuestión.

El ejercicio de atribución más importante se ha realizado para mostrar que la mayor parte del aumento observado del promedio global de temperatura desde mediados del siglo XIX se debe, probablemente, al incremento de las concentraciones de GEI de origen antrópico (IPCC-AR4, 2007). Para atribuir las causas del cambio climático se evalúa si las variaciones observadas son coherentes, en términos cuantitativos, con la respuesta esperada a los forzamientos externos (por ejemplo, los cambios de la radiación solar o de los GEI de origen antrópico) e incoherentes con otras posibles explicaciones físicamente plausibles.

Las conclusiones de diversos estudios de atribución al calentamiento global del planeta nos llevan a resolver que es improbable que este fenómeno en el siglo XX se pueda explicar por causas naturales. Las reconstrucciones paleoclimáticas demuestran que la segunda mitad del siglo pasado fue, quizá, el periodo más caliente del hemisferio norte en los últimos 1 300 años.

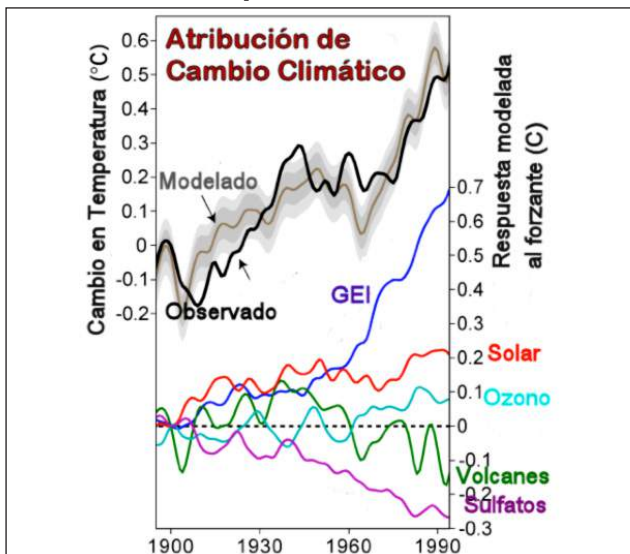
El proceso de calentamiento observado es consistente con la comprensión científica de cómo el clima debe responder a un aumento rápido en GEI, como el que ha ocurrido durante el último siglo.

La forma en que se ha calentado el planeta en ese mismo periodo es contraria con la comprensión científica de cómo el clima debe responder a los factores externos naturales, como: variabilidad en radiación solar o la actividad volcánica.

Gracias a los modelos del clima se pueden analizar las variaciones observadas en el clima de la Tierra. Cuando los efectos de aumentar concentraciones de GEI se incluyen en los modelos, así como factores externos naturales, se generan buenas simulaciones del calentamiento ocurrido durante el último siglo (ver figura 1).

Los modelos no pueden reproducir el calentamiento observado cuando consideran sólo factores naturales (por ejemplo lo solar, lo volcánico, el ozono). Sin embargo, cuando los de carácter humano son incluidos (como los GEI), los modelos simulan un patrón del cambio de temperatura alrededor del globo similar al que ha ocurrido en las últimas décadas. Incluso, el patrón espacial simulado por los modelos del clima tiene ciertas características, como mayor calentamiento en las latitudes altas del hemisferio norte, que se diferencia de los patrones de la variabilidad natural del clima que se asocian a procesos internos, como *El Niño*.

Figura 1
Capacidad de un modelo global del clima para reconstruir el registro histórico de la temperatura y grado al que los cambios de temperatura observados corresponden a un forzante externo



Fuente: IPCC-AR4.

Detección de cambio climático

Uno de los requerimientos para trabajar detección de cambio climático a escala regional o local es tener datos de calidad. El Grupo de Expertos en Detección de Cambio Climático e Índices (ETCCDI, por sus siglas en inglés), del Programa de Variabilidad y Predecibilidad del Clima (CLIVAR) de la Organización Meteorológica Mundial tiene el mandato de solventar las necesidades en la medición y caracterización objetivas del clima mediante apoyo para la coordinación internacional, fomentando la comparación entre datos modelados y observaciones. Lo anterior, incluye los aspectos prácticos del desarrollo de materiales y guías para los servicios meteorológicos nacionales con el fin de guiar el cálculo y uso de los índices de detección de cambio climático y la homogeneización de datos climáticos, el mejoramiento de la cobertura global y la evaluación de los índices.

El uso sistemático de índices climáticos ha permitido mejorar el diagnóstico global de los cambios en extremos de temperatura y precipitación, contribuyendo al reporte de evaluación del IPCC. En la región de Norteamérica (Canadá, EE.UU. y norte de México) se ha encontrado evidencia de cambios consistentes con el aumento de la temperatura del planeta: incremento en la lluvia intensa, aumento en los eventos de temperaturas altas y disminución de eventos de temperaturas bajas (Peterson *et al.*, 2008).

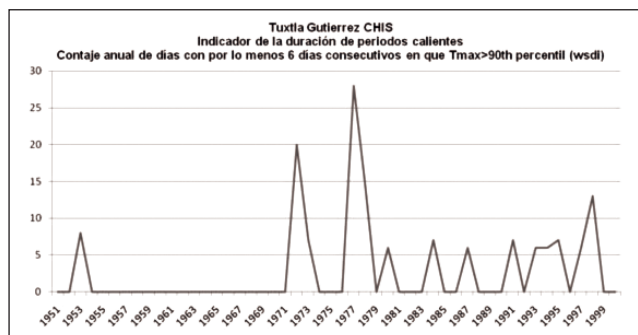
Los datos climáticos de México para detectar señales de este tipo incluyen:

- Estaciones no influenciadas por efectos de cambios de uso de suelo.
- Estaciones con efecto de cambio de uso de suelo (como la urbanización).
- Estimaciones de cambios en parámetros climáticos (reanálisis).
- *Proxi* de cambios en el clima en plazos más largos (por ejemplo, anillos de los árboles).

Existen numerosos casos que muestran las modificaciones en el clima de México, coherentes con las variaciones de baja frecuencia en el clima global. El calentamiento tiene, en nuestro país, una señal definida, sobre todo hacia la región noroeste. Usando datos de algunas estaciones (cuya calidad ha sido considerada adecuada para el análisis de las tendencias de los extremos) se han identificado

cambios en la actividad de ondas de calor, de tormentas intensas o de periodos secos en diversas partes, como Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, donde se encuentra que los episodios de ondas cálidas son cada vez más frecuentes (ver figura 2a), mientras que los sucesos fríos han disminuido en un lapso de alrededor de 50 años (ver figura 2b).

Figura 2a
Número de días/año en que la temperatura máxima rebasó el percentil 90% en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas



En algunas regiones de México, el ciclo hidrológico muestra algunos cambios significativos. Quizá una de las zonas en las que preocupa más es en el sur. Las inundaciones en Tabasco en años recientes son, en cierta forma, reflejo de la intensificación del ciclo hidrológico regional (ver figura 2c) aunque, en mayor medida, de un incremento en la vulnerabilidad regional producto del mal manejo de la cuenca (Landa *et al.*, 2008).

Figura 2b
Número de días/año en que la temperatura mínima fue inferior al percentil 10% en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

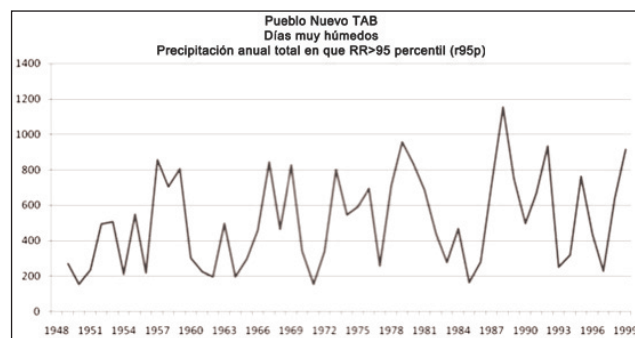


Atribución de cambio climático en México

La distinción entre los efectos de influencias externas y la variabilidad interna del clima requiere la comparación cuidadosa entre los

cambios observados y los que se esperan con un forzante externo. Estas expectativas se basan en la comprensión física del sistema de clima y ésta, a su vez, en principios físicos. La comprensión de cómo funciona el clima puede tomar la forma de modelos conceptuales o ser cuantificada con modelos numéricos que responden a forzantes diversos (anomalías de temperatura de superficie del mar, GEI, entre otros). Un amplio espectro de modelos climáticos se utiliza para proyectar el clima, extendiéndose desde los simples del balance de energía, pasando por otros de complejidad intermedia y llegando a los acoplados atmósfera-oceano-biosfera.

Figura 2c
Precipitación anual total en que la precipitación diaria rebasó el percentil 95% en Pueblo Nuevo, Tabasco



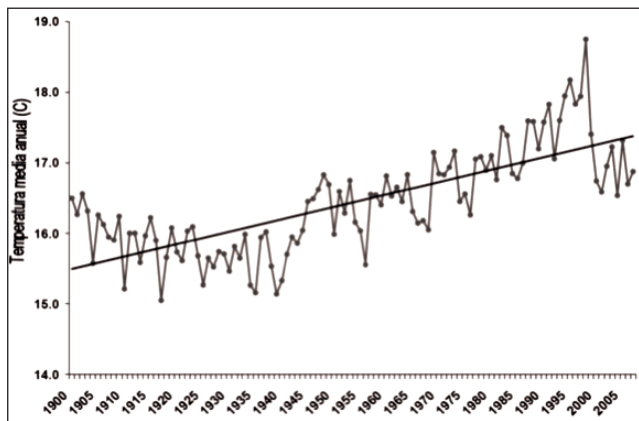
El nivel al cual un modelo puede reproducir las características dominantes del sistema climático y sus variaciones, como el ciclo estacional, incrementa su credibilidad para simular cambios en el clima, sin embargo, la comparación entre los cambios observados y los esperados se realiza de diversas maneras y no sólo comparando el ciclo anual en algún país.

Las pruebas estadísticas objetivas intentan identificar en observaciones las respuestas a uno o varios forzantes, considerando la época y/o el patrón espacial de las respuestas previstas. La respuesta forzada no se desarrolla necesariamente como tendencia lineal, pues requiere analizar cambios simulados y observados en el contexto del forzante externo considerado; por ejemplo, anomalías tipo *El Niño* responden en la parte convectiva, siguiendo la física dada por la ecuación de Clausius Clapeyron y la dispersión de ondas tipo Rossby en la esfera (Magaña y Ambrizzi, 2005).

En el caso de los análisis de cambio climático, los modelos globales del clima serán más creíbles si reproducen de forma aproximada la respuesta de baja frecuencia cuando incluyen GEI, la cual es de tipo exponencial, esto es, la velocidad del calentamiento se ha ido incrementando en décadas recientes (IPCC-AR4, 2007). Establecer las tendencias del clima regional de manera adecuada requiere contar con observaciones de calidad.

En la actualidad se trabaja en explicar las señales de cambios en el clima a escala de cuencas, pues el reto de la adaptación al cambio climático requiere de acciones a este nivel. Sin embargo, hay diversas causales que pueden alterar el clima en escalas de decenas de kilómetros; por ejemplo, el crecimiento urbano y el efecto de *isla de calor* son factores que alteran el clima a escala regional. Uno de los casos más claros de esto es la ciudad de México (Jáuregui, 1997); el rápido crecimiento urbano llevó a un aumento de la temperatura de alrededor de 3° C en casi 100 años (ver figura 3); es evidente que el cambio de clima en la ciudad de México no es sólo el reflejo del calentamiento global, sino que es algo local, pero, ¿cuánto del calentamiento es por urbanización y cuánto, por el efecto global?

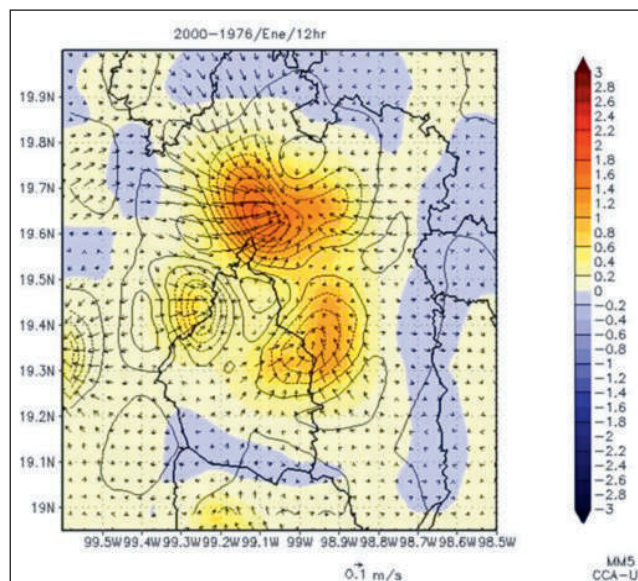
Figura 3
Temperatura media anual en Tacubaya, Distrito Federal



Diferenciar señales requiere del uso de modelos para iniciar el ejercicio de atribución. Usando uno de mesoescala tipo MM5 y forzando el clima de invierno con cambios en el uso de suelo que corresponden al crecimiento urbano observado entre 1970 y el 2000 es posible tener una idea de los cambios en el clima local por crecimiento de la ciudad. El cambio de diversos tipos de vegetación por asfalto y concreto tiene como consecuencia un calentamiento local;

así, 2.5° C de los 3° C de incremento en temperatura media en el periodo se pueden explicar por efecto de la urbanización (ver figura 4); por lo tanto, un poco menos de 1° C de calentamiento tiene que ver con efectos de variabilidad natural y con cambios en la temperatura promedio global del planeta.

Figura 4
Diferencia entre la temperatura media y vientos modelados para enero con uso de suelo de 1976 y uso de suelo del 2000



Eventos extremos en el clima y cambio climático

En años recientes se ha abusado del paradigma naturalista para explicar los desastres en el mundo. Al igual que en la década de los 90 se culpaba a *El Niño* de los males que ocurrían en diferentes partes del mundo, hoy en día se recurre al cambio climático como el factor que genera desastres. Tales explicaciones son, por lo general, equivocadas, pues en la mayoría de los casos los desastres son la materialización del riesgo, y éste se forma por la amenaza (como la condición extrema del clima) y por la vulnerabilidad, construida socialmente. Por lo general, el incremento de la vulnerabilidad es el factor más importante en la elevación del riesgo y, por ello, en la mayor frecuencia e intensidad de los desastres.

Queda, sin embargo, la pregunta: ¿se pueden explicar los acontecimientos extremos individuales del clima (sequía severa en alguna región, por ejemplo) o el tiempo (tormenta u onda de frío en algún lugar) en

términos del cambio climático global? En la mayoría de los casos se trata de variaciones en tiempo o clima que, tal vez, corresponden a la variabilidad natural.

Si bien es cierto que los cambios en extremos del clima se esperan conforme éste se calienta en respuesta a mayores concentraciones de GEI de actividades humanas, la determinación de si un acontecimiento extremo específico sólo es debido a una causa específica (como el calentamiento global) es difícil, si no imposible, por dos razones: 1) los acontecimientos del extremo son causados, en general, por una combinación de factores y 2) una amplia gama de acontecimientos extremos es una ocurrencia normal, incluso en un clima constante. No obstante, el análisis del calentamiento observado durante el último siglo sugiere que la probabilidad de algunos acontecimientos extremos (como las ondas de calor) ha aumentado debido al efecto invernadero incrementado y que la probabilidad de otros extremos meteorológicos (heladas o noches extremadamente frías) ha disminuido. Algunos estudios recientes estiman que las influencias humanas en el clima han acrecentado el riesgo de veranos europeos muy calientes, como el experimentado en el 2003.

La gente afectada por acontecimientos extremos del tiempo pregunta, a menudo, hasta qué punto el calentamiento global es responsable, ¿podría una influencia humana (como la relacionada con las concentraciones crecientes de GEI en la atmósfera) haber causado algún desastre reciente de origen hidrometeorológico? Como ya se mencionó, resultan de una combinación de factores, por ejemplo, los del verano europeo caliente en extremo del 2003 incluyeron un sistema de alta presión persistente que fue asociado a los cielos muy claros y al suelo seco que resultaron en más energía solar disponible para calentar la Tierra porque menos energía fue consumida para evaporar la humedad del suelo.

Algunos elementos climáticos pueden ser afectados por actividades humanas, como: el calentamiento global del planeta y, en particular, la elevación de la temperatura superficial del mar. No obstante, hay casos difíciles de explicar en ese mismo contexto; por ejemplo, no es simple detectar una influencia humana en un acontecimiento extremo solo, específico, como un huracán o una helada, pero puede ser posible utilizar modelos para determinar si las influencias humanas han cambiado la probabilidad de ciertos tipos de acontecimientos extremos, como la ola de calor del 2003 en Europa,

para lo cual se usó un modelo del clima, incluyendo sólo cambios históricos en los factores naturales que lo afectan, tal como actividad volcánica y cambios en la radiación solar para ver si por forzantes naturales se podía llegar a una condición de un verano en extremo caluroso. Mediante un experimento con un clima más cálido por causa de los GEI se mostró que sólo combinando factores humanos y naturales se obtiene una simulación de la evolución del clima europeo más cercana a lo ocurrido en ese año.

Un trabajo de modelado más detallado será requerido para estimar el cambio en el riesgo bajo acontecimientos climáticos o meteorológicos de alto impacto en zonas específicas, como la ocurrencia de una serie de noches muy calientes en una zona urbana. Los modelos del clima usados deben representar de manera adecuada la variabilidad del clima natural para distinguir una señal de origen antrópico. De esta manera, los ejercicios de atribución con modelos y un entendimiento de la física del clima llevarán a planear de mejor forma los procesos de desarrollo regional y global.

Conclusiones

En años recientes se han desarrollado numerosos estudios que muestran que el clima de nuestro planeta (representado no sólo por valores medios sino incluyendo variabilidad y extremos) ha cambiado de manera significativa. Se han desarrollado herramientas estadísticas para garantizar la calidad de los datos usados y, prácticamente, se han documentado cambios del clima en todo el mundo. Sin embargo, los retos para desarrollar trabajos que demuestren en qué medida los cambios detectados son consecuencia del proceso de calentamiento global son mayores.

Poco a poco surgen en el mundo grupos de científicos interesados en explicar muchos de los cambios que el clima viene experimentando de forma regional e, incluso, local. Dichos grupos sustentan gran parte de su trabajo en el entendimiento de los procesos y en la modelación climática. Sin duda, poco a poco los modelos del clima tendrán más influencia no sólo para la planeación de actividades de un año a otro, sino que serán utilizados para definir estrategias de desarrollo de largo plazo que aminoren los impactos esperados del cambio climático. ■

Referencias

- Aguilar, E. et al. (2005): Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961-2003. *J. Geophys. Res.*, 110, D23107, doi: 10.1029/2005JD006119.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130-141. doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF.2.0.CO.
- IPCC-AR4 (2007). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, Cambridge University Press.
- Jáuregui, E. (1997). Heat Island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3 821-3 831.
- Landa, R., V. Magaña, y C. Neri (2008). *Clima y agua: elementos para la adaptación al cambio climático*. Ed. SEMARNAT.
- Magaña, V. y T. Ambrizzi (2005). Dynamics of subtropical vertical motions over the Americas during El Niño boreal winters. *Atmósfera*, 18, 211-234.
- Peterson, T. C., X. Zhang, M. Brunet-India and J. L. Vázquez-Aguirre (2008). Changes in North American extremes derived from daily weather data. *J. Geophys. Res.*, 113, D07113, doi:10.1029/2007JD009453.