

# La influencia antropogénica en el Cambio Climático bajo la óptica de los Sistemas Complejos

Norma Sánchez-Santillán<sup>1</sup>, Guadalupe de la Lanza-Espino<sup>2</sup>, Rene Garduño<sup>3</sup>, Rubén Sánchez-Trejo<sup>1</sup>  
Departamento El Hombre y su Ambiente<sup>1</sup>, Departamento de Zoología<sup>2</sup>, Centro de Ciencias de la Atmosfera<sup>3</sup>  
Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco<sup>1</sup>, Universidad Nacional Autónoma de México<sup>2,3</sup>  
México, D.F.

[santilla, rtrejo]@correo.xoc.uam.mx, gdlle@unam.mx, rene@atmosfera.unam.mx

**Abstract**— This study analyzed the anthropogenic influence on climate behavior as a complex system. Considering that there is an indistinct and incorrect use of the concepts of climate change, climate variability and global warming, we began with their definitions and progressed up to the processes of teleconnection in order to place them in context from the point of view of complex systems. Interactions, especially retrofeeding and teleconnections, between the natural and the anthropogenic spheres (atmosphere, biosphere, hydrosphere, geosphere, cryosphere, economy, society and culture) were analyzed, including exchanges of matter, energy and information. At present, 17 patterns, named planetary oscillations, have been described. Among the most analyzed are the North Atlantic Oscillation, the Pacific Decadal Oscillation, the El Niño-Southern Oscillation and the La Niña. This complexity constitutes the source of non-linearity in the climatic system, which translates into an important degree of uncertainty within the scope of the prediction and prevention of eventual climatic catastrophes.

**Keyword**— *climatic change, climatic variability, global warming, complex systems, teleconnection.*

**Resumen**— En el presente trabajo se analiza la influencia antropogénica en el comportamiento del clima como un sistema complejo. Y dado que existe un uso indistinto e incorrecto de los conceptos cambio climático, variabilidad climática y calentamiento global; partiremos desde sus definiciones hasta los procesos de teleconexión, para contextualizarlos bajo la óptica de los sistemas complejos. Se analizan las interacciones especialmente las retroalimentaciones y teleconexiones, entre las esferas naturales y antrópicas (atmósfera, biosfera, hidrosfera, geosfera, criosfera, economía, sociedad y cultura), entre las cuales hay intercambios de materia, energía e información. Actualmente se han descrito 17 patrones, llamados oscilaciones planetarias, entre los más analizados están la Oscilación del Atlántico Norte, la Oscilación Decadal del Pacífico, El Niño-Oscilación del Sur y La Niña. Esta complejidad constituye la fuente de no linealidad en el sistema climático, lo que se traduce en un importante grado de incertidumbre dentro de los ámbitos de la predicción y prevención de eventuales catástrofes climáticas.

**Palabras claves**— *cambio climático, variabilidad climática, calentamiento global, sistemas complejos, teleconexión.*

## I. INTRODUCCIÓN

Igual que todas las ciencias, la del clima ha seguido dos caminos: por un lado, la visión mecanicista y por otro, la complejidad de la relación orden-desorden-organización. Los diversos ejemplos climáticos muestran la trayectoria hacia un sentido, sin posibilidad de retorno; sin embargo, el desorden desencadenado durante el trayecto, no implica confusión y señala un nuevo paradigma en el que los fenómenos desordenados del universo, resultan necesarios en ciertas condiciones y se desarrollan desde la indivisibilidad de lo simple y lo complejo, del todo y sus partes, del orden y el desorden hasta llegar a la teoría del caos y eventualmente hasta la teoría general de sistemas, para abordar al clima como un sistema complejo. Desde esta perspectiva, el clima es el conjunto de elementos y relaciones que responden a estructuras y funciones especializadas inmersas dentro de un sistema mayor. El resultado de las interacciones es la organización del sistema y cuando persiste, genera posibles escenarios que no están regidos completamente por el azar (Sánchez- Santillán y Garduño, 2007). De ahí que en el presente trabajo se analice el comportamiento del clima como un sistema complejo, partiendo desde sus definiciones y hasta los procesos de teleconexión.

El cambio climático se ha convertido recientemente en uno de los temas más recurrentes, por lo que

el uso de los términos con frecuencia se aplica incorrectamente, incluso en la literatura científica, por lo que las afirmaciones efectuadas son controversiales, cuando no erróneas (Sánchez-Santillán y de la Lanza, 2012). De ahí la importancia de las definiciones tanto para el clima como para el tiempo meteorológico.

El clima es el estado medio del tiempo y de su variabilidad, la cual persiste y se mantiene durante un periodo prolongado (décadas o incluso más). El cambio climático, implica salir de la media del tiempo, debido a procesos naturales internos, por cambios del forzamiento externo, o bien por alteraciones antropógenas persistentes que modifican la composición química de la atmósfera (IPCC, 2007) y por ende sus procesos termodinámicos y por cambio del uso del suelo. Sin embargo las escalas de variación en el clima, dada la velocidad de alteración del uso de suelo, muestran cambios de magnitud importantes en escalas temporales cortas (varias decenas de años), y se reflejan en las fórmulas empleadas para describir su tipo climático.

El tiempo es el estado momentáneo de la atmósfera y produce una variedad de estados en diversas escalas espaciales (días nublados, lluviosos, soleados, fríos, etc.). Mientras que, el clima es el estado medio de la atmósfera, calculado a partir del promedio del tiempo, dentro de un periodo entre 30 y hasta cientos de años (Sánchez-Santillán y de la Lanza-Espino, 2012). Los valores promedio de lluvia y temperatura, durante el periodo establecido, no deben sobrepasar los límites marcados para cada tipo climático en cada uno de los diferentes sistemas de clasificación climática. En el mundo existen cinco tipos de climas de acuerdo al Sistema de Clasificación Climático de Köppen (1948), sistema que además de ser el más utilizado en el mundo, por biólogos, geógrafos, climatólogos, ingenieros y arquitectos, entre otros; está basado en la fenología de las plantas que conforman los grandes biomas del planeta, la distribución de éstos se agrupa en amplias franjas latitudinales. Los grupos y subgrupos climáticos se expresan con letras mayúsculas, seguidas de minúsculas acompañadas de subíndices y superíndices, que describen las condiciones térmicas y las pluviométricas, incluyendo la canícula. Cada tipo climático responde a los factores latitudinales, de altitud y relieve, cercanía o lejanía del mar y de la temperatura de las corrientes marinas adyacentes. México registra los cinco tipos debido a su accidentada orografía, que aunada a la altitud de su relieve, emula las condiciones de los climas de áreas ubicadas latitudinalmente por arriba de los 50° pese a estar dentro de la franja intertropical. La combinación de cada uno de los factores mencionados explica las diferencias en los límites de temperatura, precipitación, humedad, presión barométrica y rapidez y dirección del viento establecido para cada tipo climático.

La lluvia y la temperatura son los elementos del clima más estudiados dentro del período instrumental (1775 a la fecha) y, para periodos más amplios, se utilizan herramientas *proxies*, las cuales se utilizan para elaborar reconstrucciones paleoclimáticas a partir de un dato crudo, como por ejemplo, la distancia entre los anillos de crecimiento de la madera temprana y la tardía en los troncos de los árboles (denominadas traqueidas), pudiendo inferir no sólo la cronología, es decir el tiempo en el que ocurrió un evento récord, sino también el dato *proxy* referente al volumen de lluvia, la temperatura o incluso la presión barométrica, ya que dichas variables afectan el crecimiento del árbol. Entre los *proxies* de alta resolución se utiliza la dendrocronología porque provee series continuas de varias centurias y en algunos casos de varios milenios (Ceballos, 2002). En los resultados encontrados con la segunda técnica, en los núcleos de hielo de Vostok en la Antártida, por ejemplo, se aprecia un comportamiento periódico denominado dientes de sierra, por el aspecto de su representación gráfica (Garduño *et al.*, 2005). Dicha configuración contiene varios ciclos anidados entre sí; cada cúspide de la sierra representa un evento de variabilidad distinto en tiempo e intensidad y las cúspides mayores corresponden a transiciones abruptas entre periodos de calentamiento rápido y enfriamiento lento, y las pequeñas, a variabilidades de menor intensidad, aunque con mayor regularidad. El comportamiento de los elementos climáticos evidencia la intensidad de la variabilidad en cada localidad; sin embargo, si ésta no sobrepasa el límite establecido por el sistema de clasificación climática para cada tipo de clima,

no se puede hablar de un cambio o variación climática. Un cambio climático implicaría que durante un periodo igual o superior a 30 años, los registros de lluvia y temperatura permanecieron fuera de los límites establecidos para su tipo, de manera que al estimar el valor medio de los elementos climáticos, automáticamente se ubicaría en otro tipo de clima.

Por otro lado, los climas están distribuidos en franjas latitudinales irregulares dentro de las cuales es factible hallar, incluso otra región climática distinta, matizada por sus propios rasgos físicos (disposición y altura del relieve y proximidad a las cuencas marinas), (Gil y Olcina, 1997), entonces resulta incorrecto hablar de un cambio global del clima, ya que como tal, no existe un tipo climático para todo el planeta.

En la escala temporal humana el creciente y poco planificado cambio del suelo para fines de asentamientos humanos, incluye básicamente la construcción de ciudades y, de manera adyacente las actividades económicas que acompañan a éstas, impacta de manera irreversible a los elementos del clima, dando origen en las ciudades, al fenómeno de *isla de calor* (Jáuregui, 2000). Las alteraciones registradas en las ciudades incluyen una reducción en el albedo (por el predominio de colores oscuros) y la falta de agua líquida para evaporar por la ausencia de áreas verdes proporcionales a las áreas construidas (Correa *et al.*, 2003). El aumento térmico derivado de las características físicas del concreto y el asfalto (gris y negro, respectivamente), acumulan el calor proveniente del Sol durante el día y lo disipan durante la noche, incrementando no sólo las temperaturas diurnas, sino también las nocturnas (Olgay, 2005).

El calor generado por aparatos, maquinaria y autos, así como los gases de efecto invernadero que estos últimos emiten, provoca que las temperaturas se incrementen proporcionalmente al tamaño de la mancha urbana dificultando la disipación del calor durante la noche. Al cambio en el comportamiento de dichos elementos del clima dentro de las ciudades, se le denomina calentamiento climático antropogénico dentro del Marco de Las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (1992). No obstante, si bien son muchos los estudios de bioclimatología que se han desarrollado para las ciudades (p. ej., Jáuregui, 1993; 2000), pocos lo analizan utilizando los valores límites establecidos en los sistemas climáticos y en múltiples ocasiones se restringen a estimar la tendencia de la temperatura. Lo anterior implica un desconocimiento acerca de si en dichas islas de calor la temperatura ha sobrepasado los límites estipulados para cada tipo climático, lo que probaría la ocurrencia de cambios en las fórmulas climáticas de las urbes y, por ende, cambios climáticos.

A medida que las ciudades crecen se registra un incremento térmico y en años anómalamente cálidos pueden detonarse ondas de calor, las cuales aumentan la morbilidad de la población vulnerable (niños, enfermos y ancianos). El umbral térmico para una onda de calor varía geográficamente de acuerdo a la latitud en la que se ubica la urbe. En el caso de la Ciudad de México, a una altura de 2,250 msnm y dentro de la franja intertropical (19° 24' N y 99° 12' W), el intervalo de temperatura oscila entre 25° y 30°C. Para que se declare la onda de calor, dichas temperaturas deben mantenerse durante tres días consecutivos; estos fenómenos ocurren entre los meses de marzo, abril y mayo, cuando la humedad relativa baja hasta 20%, lo que además, favorece la sensación de estrés térmico entre la población y se refleja en un malestar generalizado, disminución en la concentración y somnolencia, entre otros (Jáuregui, 2009). Dependiendo de la localización geográfica de cada ciudad, serán los meses en los que se presente la onda de calor.

Las primeras ondas de calor registradas en el mundo ocurrieron en 1934, 1935 y 1936 en diversas ciudades de Estados Unidos, donde fallecieron más de 15,000 personas y se alcanzaron temperaturas de 49°C, aunadas a una pérdida del 80% de las cosechas de ese país. Durante el verano de 2003 Europa marcó un récord en la historia, tanto por la intensidad de la onda como por su duración, afectando a Alemania (37.9°C), Dinamarca (32°C), Inglaterra (37.9°C); Portugal (47.3°C), Italia, Suiza, Austria, diversas ciudades de España, como Badajoz (44.8°C), Barcelona (37.3°C), Huelva (43.4°C) y San

Sebastián (38.6°C) y, particularmente, el este de Francia donde las temperaturas rebasaron los 40°C. En la ciudad de París durante el día se registraron 39°C y durante la noche 25.5°C. Lo anterior implica una diferencia entre el día y la noche de 13.5°C, mientras que en años normales y para esos meses, las temperaturas entre el día y la noche oscilan alrededor de los 25°C (Meehl y Tebaldi, 2004).

En Francia se estima que los fallecidos alcanzaron las 15,000 personas; inicialmente considerada la mayor cifra de Europa. España, por su parte, publicó en el Informe emitido por el Centro Nacional de Epidemiología la cantidad de 6,500 decesos, Portugal 1,316 e Italia 20,000. Las muertes ocurrieron entre junio y septiembre, periodo durante el cual hubo reiteradas ondas de calor. Globalmente la onda de calor propagada por toda Europa, dejó tras de sí más de 150,000 decesos (Conti *et al.*, 2005).

En el verano del año 2005 se registró otra ola de calor acompañada de una sequía considerable, afectando España, Francia e Italia. En éstas se decretó una alerta nivel 3 (máximo nivel en la escala), debido a que las sensaciones térmicas oscilaron entre 38° y 40°C, implementándose por parte de los organismos de protección civil de los gobiernos, mecanismos de información, además de un seguimiento exhaustivo a la población más vulnerable, para evitar las terribles pérdidas humanas ocurridas dos años atrás. En el año 2010, la vulnerabilidad ante las olas de calor en las grandes urbes a nivel mundial se incrementó 50% (Barriopedro *et al.*, 2011).

La quema de combustibles fósiles por el transporte y la industria aporta una cantidad importante de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), paralelamente la crianza masiva de ganado y el cultivo de arroz constituyen un aporte importante de metano (CH<sub>4</sub>), y como parte de la actividad industrial, se emiten óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruros de azufre (SF<sub>6</sub>), (IPCC, 2007); en conjunto estos gases incrementan el efecto invernadero. El tópico de cambio climático derivado de las actividades humanas gira en torno a dichos gases, sin embargo el término tiene, de origen, un problema no sólo semántico sino también conceptual, que se analiza a lo largo del presente artículo.

## II. LAS ESFERAS DEL SISTEMA CLIMÁTICO

El sistema climático de la Tierra lo forman ocho esferas, cinco naturales y tres antrópicas que interactúan entre sí; las primeras son la atmósfera, la biosfera, la hidrosfera, la geosfera y la criosfera; las segundas, la economía, la sociedad y la cultura (Vázquez, 2006). Durante los procesos de interacción hay intercambios de materia, energía e información, constituyendo la principal fuente de no linealidad en el sistema, lo que se traduce en un importante grado de incertidumbre, dentro de los ámbitos de la predicción y prevención de eventuales catástrofes climáticas, desde la perspectiva antrópica.

Entre todas las partes interconectadas dentro del sistema ocurren flujos de masa, energía y momento y, puesto que la Tierra como un todo, se comporta como un sistema natural cerrado, aunque no aislado, ingresa energía proveniente del Sol y a su vez el planeta emite longitudes infrarrojas hacia el espacio exterior. Todos estos flujos se conectan al interior del sistema climático por medio de ciclos o subsistemas entre los que encuentran el ciclo hidrológico, el del carbono y, en general, todos los ciclos biogeoquímicos en los que también interviene la biota; de modo que lo que sale de una de sus partes se reincorpora al sistema como entrada en otra de ellas, formando una extensa y compleja cadena de retroalimentaciones. A dicha cadena se le denomina *conversación cruzada* (Vázquez, 2006) e invalida el principio de superposición propio de los sistemas lineales, en los cuales el todo es exactamente igual a la suma de sus partes. En un sistema de tipo no lineal, como el climático, dicho principio no se cumple ya que el todo es más que la suma de sus partes.

La secuencia de observaciones en los registros climáticos en todas sus escalas temporales, evidencia un comportamiento variable, con múltiples y frecuentes irregularidades e inesperados cambios bruscos, todos ellos característicos de un sistema con una dinámica no lineal. Este tipo de sistemas durante su evolución cruzan puntos o umbrales de inestabilidad, antes de alcanzar el siguiente estado de equilibrio.

Cabe señalar que mientras en los sistemas lineales hay una proporción entre los estímulos y las respuestas, en los no lineales los pequeños estímulos o forzamientos pueden desencadenar cambios importantes en su comportamiento, dada la naturaleza caótica de los mismos (Vázquez, 2006).

El carácter no lineal del sistema climático origina fluctuaciones, transiciones rápidas, irregularidades e incluso, comportamientos inesperados de carácter aleatorio, debido a la complejidad de las interacciones entre sus múltiples y diversos componentes, de los cuales hoy en día, se comprenden muy poco, ya que entre ellos, se desencadenan procesos de autoorganización espontánea y coherente, a los que se les denomina comportamientos emergentes, los cuales no son explicables por la simple adición de los componentes de un sistema, sino que resultan de la interacción de éstos en un nivel de organización superior. La presencia de un número tal de causas dentro de un proceso o mecanismo analizado, hace muy difícil precisar cuál de ellos es el determinante y donde el azar cumple un papel altamente significativo; razón por la cual se habla de multi-causalidad dentro de los estudios de climatología, bajo la perspectiva de los sistemas complejos (Holland, 1995).

Para establecer las propiedades emergentes en el sistema climático, hay que distinguir en sus escalas espacial y temporal, las diferencias entre los elementos, las partes y el todo. La importancia de esta distinción radica en conocer el punto donde se cruzan y anidan cada uno de los ciclos de los elementos del proceso, dando lugar a una co-evolución entre los componentes de éste; hasta eventualmente alcanzar el nuevo estado de autoorganización. Como parte de la complejidad, resultan las emergencias, las cuales dentro del sistema indican la posesión de cualidades y atributos que no se manifiestan en las partes aisladas. La presencia o aparición de los fenómenos emergentes no siempre es evidente a partir de una descripción del sistema y consisten en la especificación del comportamiento de sus componentes individuales y de las reglas de interacción entre ellos; de manera que si el sistema se descompone en sus partes también se perderán dichas propiedades emergentes. El estudio de la complejidad consiste en el análisis de los procesos que dependen, a la vez, del azar y de la adquisición de nuevos estados de autoorganización (Ritter *et al.*, 2002).

La autoorganización es una capacidad inherente a los sistemas complejos no lineales, e implica que cada vez que ocurre una perturbación en el sistema, existe la posibilidad de que se presente una novedad. Un ejemplo de esto sería la ocurrencia aleatoria de una mutación en un individuo de una población biológica que posibilita su adaptación ante un cambio climático, como los ocurridos durante la transición entre un periodo glacial y uno no glacial, cambiando su papel dentro del ecosistema. Así entonces, los agentes auto-reproductivos evolucionan, en un contexto de incertidumbre, a través de generar diversidad genética. El contenido dinámico e informacional, al lado del intercambio de materia y energía, también es inherente al proceso viviente, como resultado los sistemas vivientes y los cognitivos pueden ser asumidos como colectores, procesadores y usuarios de información (Zhuravlev y Avetisov, 2006).

Caos y complejidad son características propias de la evolución no lineal de los sistemas naturales, como el climático. El caos es el comportamiento que puede mostrar un sistema, cuando las pequeñas diferencias entre dos estados dinámicos alcanzan grandes discrepancias en tiempos posteriores no muy distantes, dando lugar a que sus trayectorias diverjan rápidamente. Un ejemplo de esto es el acoplamiento entre la atmósfera y el Océano Pacífico Ecuatorial que alterna, con una apariencia aleatoria y caótica, tres estados *cuasi*-estables, con efectos regionales muy distintos entre sí: épocas neutrales, de El Niño y de La Niña. El paso entre estos tres diferentes estados involucra una gran perturbación en la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera; entonces el sistema generará una nueva organización para alcanzar el equilibrio y el tiempo que tarde en regresar a su estabilidad, estará en proporción directa a la intensidad de la perturbación. Durante las transiciones habrá una pérdida de energía por parte de los diferentes elementos del sistema, lo que incrementa la entropía. Paralelamente, en cada fase de inestabilidad seguida de una estabilidad, el sistema va adquiriendo información y, por



ello, no regresa al punto inicial; es precisamente esta ganancia de información la que permite la evolución de cada una de las partes, desencadenándose entonces, un proceso de co-evolución (Díaz, 2011).

Otro fenómeno que también se manifiesta con oscilaciones irregulares de tipo no lineal, es la interacción océano-atmósfera denominada Oscilación del Atlántico Norte (OAN), que constituye una estructura primordial dentro de la variabilidad climática atmosférica; su importancia radica en que explica aproximadamente un 50% de la fluctuación en la presión atmosférica a nivel del mar en el Atlántico Norte y ejerce una clara influencia en el clima regional del este de Norte América y el oeste de Europa durante todo el año, aunque mayormente en el periodo invernal, ocasionando sequías o lluvias torrenciales (Wanner *et al.*, 2001). En México la OAN regula en buena medida la variabilidad de la lluvia y la temperatura, aunque no es posible cuantificar su efecto a escala nacional, pues existen pocos estudios sobre el tema (Sánchez-Santillán *et al.*, 2006).

La complejidad se refiere a la singular manera del comportamiento que tienen los sistemas complejos, tanto en sus componentes como en sus procesos. Como los episodios de calentamiento global ocurridos al final de las glaciaciones; por ejemplo al final de la última glaciación en el Holoceno, donde se han estimado cambios hidrológicos drásticos a escala regional como la desecación en el Sahara, fluctuaciones en los caudales de los lagos ecuatoriales africanos en escalas decadales, o la acumulación multi-anual de periodos de sequía tras periodos muy húmedos en diversas regiones del mundo (Kröpelin *et al.*, 2008).

### III. RETROALIMENTACIONES Y ESCALAS EN EL SISTEMA CLIMÁTICO

Hay dos tipos de retroalimentación en el sistema climático, las de amplificación (positivas) y las de amortiguamiento (negativas); unas involucran procesos físicos (retroalimentación albedo-criosfera), otras físicos y biológicos (retroalimentación albedo-vegetación) y otras más, biogeoquímicas (geología-biología-hidrología-química); dentro de estas últimas, las hay naturales y derivadas de las actividades antropogénicas. Sin embargo, nuestro planeta se las ha arreglado para establecer un equilibrio neto entre las retroalimentaciones, aunque hay un ligero predominio de las de control sobre las de amplificación, al menos durante las fluctuaciones, incluso las drásticas provenientes de los forzamientos externos, como las variaciones de la energía solar que llega a nuestro planeta, o internas derivadas de la modificación del uso de suelo por razones sociales y económicas. De entre las innumerables retroalimentaciones de todo tipo, de muchas de ellas se desconoce, incluso, si son positivas o negativas.

Un ejemplo en la historia reciente del hombre, donde el efecto de las fluctuaciones en la energía solar causó importantes estragos, ocurrió en Europa entre los años 1645 y 1715, conocido como el Mínimo de Maunder. Durante estos 70 años, la actividad solar mermó considerablemente y ocasionó una pequeña edad del hielo, los glaciales descendieron latitudinalmente hasta el norte de Italia y los tipos climáticos de Europa cambiaron su fórmula, pasando de templados a fríos (Acot, 2005). Sin embargo, conforme la actividad solar retomó su ciclo, los procesos de retroalimentación climática de la Tierra, desencadenaron un retorno de los tipos climáticos a su condición original de templados. Los bosques de coníferas y arces no murieron, ni tampoco el resto de las especies que cohabitaron en ambos ecosistemas, únicamente hubo una disminución de su abundancia poblacional. Durante el citado periodo, tanto las coníferas como los arces, tuvieron un crecimiento lento, generando una reducción importante en la distancia entre las traqueidas de la madera temprana y la tardía (Rigozo *et al.*, 2008). Las traqueidas son células muertas alargadas, con forma generalmente aguzada en los extremos, cuya función es conducir el agua y las sales simples; con dicha reducción, la madera de sus troncos se hizo compacta, propiedad altamente valiosa para la construcción de instrumentos musicales, pues les brinda una sonoridad inigualable; como el caso de los violines fabricados por Stradivarius y Guarnerius, lauderos que vivieron durante esa época.

El clima no es en absoluto lento y gradual, por el contrario, puede reaccionar rápida y violentamente en todas sus escalas espaciales y temporales; al considerar su historia, esto parece ser la norma más que la excepción; de hecho, esta es la razón por la que se considera que los modelos climáticos son *no robustos*, es decir que presentan cambios drásticos y en gran medida impredecibles, incluso ante perturbaciones pequeñas. Desde el punto de vista de la incertidumbre y la irregularidad inherentes al sistema climático, existe un amplio registro histórico de múltiples catástrofes climáticas bajo la perspectiva antropogénica y constituyen un reto para proponer métodos que mitiguen la vulnerabilidad y el riesgo tanto de la población como de sus recursos. Asimismo, se requiere plantear estrategias para evitar el grave daño provocado por el cambio en el uso del suelo derivado del represamiento de ríos (creación de presas), la siembra extensiva de monocultivos, la crianza masiva de especies (sobre todo bovinos) y el crecimiento sin planeación de los asentamientos humanos, los cuales en conjunto y a corto plazo, desencadenan más problemas de los que resolvieron en su planteamiento inicial.

Desde la perspectiva humana se ha querido ver al sistema climático bajo una percepción de estabilidad, como un sistema lineal; sin embargo, los registros históricos evidencian cambios abruptos que han moldeado no solo los procesos naturales, sino incluso, su propia historia, misma que se refleja en el auge y caída de múltiples civilizaciones; ejemplos bien documentados de esto se tienen en Egipto durante la época faraónica entre 2150 a.C., en Teotihuacán el máximo desarrollo se alcanzó alrededor del año 500 d.C. y sucumbió paulatinamente entre el periodo de 750-800 d.C., más recientemente, la prosperidad en Europa durante el periodo denominado Cálido Medieval registrado entre el 800 y hasta el 1300; en contraparte con las prolongadas sequías, en la misma época, que afectaron las áreas tropicales y subtropicales (responsables, en parte, del colapso de algunas de las civilizaciones del Clásico en México), como lo señala Fagan (2008). La estabilidad climática medieval en contraparte con las sequías tropical y subtropical denotan la coexistencia de distintos modos de equilibrio, estable e inestable, respectivamente y, de acuerdo a los factores ambientales que operan dentro de un sistema no lineal, sitúan en un estado o en otro las distintas regiones del planeta, donde la transición entre una fase y otra, es mucho más veloz que el forzamiento, también llamado estímulo; en el sistema climático como sistema no lineal, a pequeños estímulos o forzamientos que operen sobre ellos pueden seguir cambios de comportamiento, dada la naturaleza caótica de los mismos. Comportamiento imposible de detectar si consideramos al sistema climático como un sistema lineal.

#### IV. ESCALAS PARA EVALUAR EL CAMBIO CLIMÁTICO, INVOLUCRANDO AL CO<sub>2</sub>

Hacia finales del siglo XIX y gran parte del XX, el clima de la Tierra, de acuerdo a los criterios y formas de medición efectuados hasta entonces, señalaban una estabilidad en escalas de décadas a siglos, dando origen al concepto de Normal Climatológica (Organización Meteorológica Mundial, 2007). Sin embargo, el desarrollo de la paleoclimatología, junto con las herramientas *proxies*, evidenció la magnitud de las fluctuaciones climáticas registradas a lo largo de la historia del planeta.

El cambio en el contenido de los gases de la atmósfera, entre los que se encuentra el CO<sub>2</sub> es una de las múltiples causas de las variaciones en la temperatura. En el Paleoceno tardío, hace 56 Ma (millones de años), las concentraciones de CO<sub>2</sub> fueron alrededor de 2,000 ppm (partes por millón) y para el Mioceno temprano, hace 24 Ma, cercanas a 500 ppm (Pearson y Palmer, 2000). En ambas épocas geológicas, hubo un incremento térmico considerable que permitió la dispersión hacia las regiones australes y boreales de La Patagonia y Groenlandia, respectivamente, de la vegetación subtropical compuesta mayoritariamente de palmeras. Dicho efecto térmico, con la consecuente dispersión vegetal, estuvo aunado a una gran cantidad de nichos vacíos provocados por la extinción del Cretácico tardío, razón por la cual el Paleoceno se caracterizó por el gran desarrollo evolutivo de especies vegetales modernas que, favorecidas por las temperaturas cálidas, dieron lugar a los espesos bosques tropicales, subtropicales y caducifolios de todo el mundo y, entre ellas, a las primeras selvas modernas. Simultáneamente, en las regiones de los casquetes polares libres de hielo, se asentaron grandes

extensiones de coníferas.

Durante el Paleoceno, que abarcó 32 Ma, hubo un máximo térmico que perturbó la circulación atmosférica y oceánica, e impactó tanto el hábitat marino como el terrestre, desencadenando la extinción de amonites y múltiples especies de foraminíferos, razón por la cual durante el Cretácico tardío existieron las condiciones para una explosión en la diversidad de la fauna; asimismo, el ambiente tropical de sus aguas favoreció la abundancia de especies formadoras de arrecifes de coral (Fortey, 2009). Los cambios en los ambientes terrestres y marinos, antes señalados, son claros ejemplos de la co-evolución desencadenada por las propiedades emergentes que surgieron tras un cambio drástico en el sistema climático, en el que estuvieron involucradas la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera y la biota, tras la perturbación provocada por el impacto del meteorito de Chicxulub, detonante entre otros procesos, de la gran extinción que marcó el fin del Cretácico.

Durante los últimos 10,000 años, correspondientes al Holoceno, los estudios efectuados en los núcleos de hielo de Vostok, en la Antártida, particularmente entre los años 1800 y 2000, se aprecia un incremento de 280 a 370 ppm en el contenido de CO<sub>2</sub>, así como un incremento en la temperatura promedio del planeta de 0.7°C entre los años 1906-2005 que, de acuerdo al Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007), panel al que algunos climatólogos aceptan como representativo del consenso general en este campo, fueron resultado de las emisiones generadas por las actividades humanas. Sin embargo, Monnin *et al.* (2001) argumentan que durante los últimos 150,000 años, ocurrieron cambios drásticos y rápidos en la concentración de dicho gas, con base en los núcleos antes señalados, mucho antes de que la actividad humana pudiera ser la responsable de los mismos. Otros autores señalan, incluso, que el incremento en el CO<sub>2</sub> es posterior al aumento térmico; la aparente relación observada entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> y las temperaturas estimadas en los últimos 150,000 años, donde se cree que esa dirección de causalidad es justamente al revés, es decir no es el CO<sub>2</sub> el quien incrementa la temperatura, al contrario, altas temperaturas aumentan los niveles de CO<sub>2</sub>; y los datos de Vostok señalan que los niveles del dióxido de carbono normalmente aumentan después de un aumento de la temperatura y no antes (Mokhov *et al.*, 2005; Jaworowski, 2007; Ritter y Pérez, 2010). Cabe señalar que el nivel natural del CO<sub>2</sub> había sido de 280 ppm antes de la era industrial y actualmente alcanza las 415 ppm.

En las décadas de 1940 y 1970 la temperatura media del planeta disminuyó 0.1°C pese al aumento sostenido en los gases de efecto invernadero. Esta aparente contradicción evidencia las dos posturas existentes ante el problema del calentamiento climático. Por un lado, el panel Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en 2007 sugirió un incremento térmico promedio para el planeta entre 1.4°C y 5.4°C para el fin del siglo XXI, consecuencia de los gases de efecto invernadero emitidos por actividades antropógenas (Murphy *et al.*, 2004). Este intervalo térmico tan amplio (3°C), entre un valor y otro se debe a los diferentes modelos matemáticos empleados, denominados genéricamente proyecciones, en las que si bien se contemplan una gran cantidad de variables, sólo la concentración del CO<sub>2</sub> se modifica en cada modelo, mientras que las demás variables se mantienen constantes. Los escenarios son modelos de relaciones causales donde, al analizar únicamente las propiedades del bióxido de carbono, se parte del supuesto de que el resto de los elementos que componen el sistema climático (biosfera, criosfera, atmósfera y océanos), así como sus interacciones que en todos los casos son no lineales, quedan inalterados, convirtiéndolos en sistemas lineales.

Por otro lado, se encuentran diversos grupos de científicos de las distintas disciplinas que conforman el sistema climático, que afirman que las fluctuaciones térmicas registradas en el planeta constituyen únicamente procesos de variabilidad climática y que son la respuesta a procesos físicos mucho más complejos que lo que los modelos matemáticos propuestos por el IPCC podrían explicar (Jaworowski, 2007). Asimismo, es importante considerar que el intervalo térmico señalado en los escenarios es



demasiado amplio, ya que durante un periodo glacial la temperatura del planeta desciende 4°C en promedio, respecto a la temperatura actual. Cabe reflexionar entonces sobre la veracidad de los modelos, cuyos aspectos más discutibles no sólo se refieren a la magnitud del incremento térmico predicho, sino al elevado nivel de incertidumbre en sus predicciones.

Respecto al aumento en la temperatura, en estudios recientes efectuados en núcleos de hielo de Groenlandia se detectaron más de 20 episodios abruptos con incrementos entre 8° y 10°C, temporalmente ubicados dentro de la última glaciación (Rial, 2004), sin que esto afectara radicalmente la vida en el planeta (Lovelock, 2005).

Los escenarios para la lluvia difieren en la distribución de la misma (Zhang *et al.*, 2008). Un ejemplo fueron los pronósticos de sequía, contrarios a lo observado, para las porciones centrales de Estados Unidos (Wallén, 1986). La habilidad del pronóstico de la precipitación es baja, ya que las interacciones entre la orografía, el tránsito de las masas de aire sobre áreas continentales o superficies marinas, la evapotranspiración y la convectividad en cada región, son altamente complejas y los softwares y hardwares actuales son insuficientes para manejar modelos tan intrincados, por una parte y, por otra, en un sentido riguroso, los procesos que se efectúan en las computadoras involucran un trabajo de síntesis, más que de análisis (Usó y Mateu, 2004).

En los últimos 150 años el avance de los cambios en el uso del suelo alcanzó proporciones globales, convirtiendo al hombre en un componente capaz de modificar su entorno a escala geológica, geográfica, hidrológica y, en consecuencia ecológica. Por ejemplo, la mala planeación de los sistemas de irrigación mediante la construcción de presas desencadenó dos problemas evidentes; el primero de ellos, la creación de represamientos cuya vida útil, en promedio, es de tan sólo 50 años, para luego transformarse en áreas eutrofizadas y anóxicas (De la Lanza-Espino *et al.*, 2010). Por otro lado, la merma de agua en los afluentes originales ocasiona graves daños en los ecosistemas por los cuales éstos corrían libremente; en el caso de las cuencas exorreicas, los afluentes transitan por más de una subcuenca antes de desembocar en el mar. Esta propuesta de causa-efecto, para resolver el abasto energético, por un lado y, por otro, la disponibilidad de agua de riego, ha conducido a una catástrofe ecológica de mayores proporciones (Kingsford, 2000), donde el problema pasó de ser local, para convertirse en un problema de cuenca hidrológica, donde revertir el proceso será mucho más costoso que los supuestos beneficios que se derivarían de la construcción de las represas.

De igual manera, la introducción en las áreas tropicales de métodos agrícolas y ganaderos deficientes transforma, paulatinamente, grandes áreas de cultivo en páramos, debido a la acumulación de sales y agroquímicos, así como al incremento en la erosión del suelo; lo que eleva el aporte de terrígenos y conlleva a la eutrofización en lagunas costeras y estuarios (Cloern, 2001), en los cuales hay una disminución importante en el caudal del afluente, por su represamiento aguas arriba y con ello, un predominio del ingreso de aguas marinas durante la pleamar. Este cambio en la concentración salina genera mortandad en los manglares, una modificación en la sucesión estacional del plancton, en la composición y abundancia de éste, con el consecuente impacto en la red trófica de dichos ecosistemas.

## V. DEJANDO ATRÁS EL DETERMINISMO

El rápido desarrollo de las grandes urbes de asfalto y concreto, por el acelerado crecimiento poblacional, que pasó de 906 millones en el año de 1800, a 6,000 millones para 2005 (World Health Organization, 2009), aunado al uso generalizado de maquinaria basada en la quema de combustibles fósiles, originó islas de calor, ubicadas en las grandes urbes. En éstas, las fluctuaciones meteorológicas son mayores en intensidad y menores en tiempo, respecto a las áreas naturales circunvecinas (Jáuregui *et al.*, 1997). El gradiente térmico se asocia a una progresiva pérdida del entorno vegetal natural, intra y peri urbano, sustituyéndolo por superficies impermeables, como el concreto, asfalto y ladrillo y otros materiales de construcción, que alteran los balances hídrico y radiativo en superficie, lo que induce, en

consecuencia, un aumento de la temperatura en las áreas urbanas, en un ambiente de sequedad extrema (Chen *et al.*, 2006; Córdova, 2011).

El sistema climático, está conformado por interacciones y retroalimentaciones heterogéneas, altamente complejas y vagamente comprendidas, que se efectúan en distintas escalas de tiempo y espacio entre el movimiento de la Tierra, por las variaciones en la intensidad de la radiación solar, el ángulo de inclinación en el que incide, la distribución de las porciones continentales en los hemisferios norte y sur, las corrientes frías y cálidas de los océanos, la atmósfera, criosfera, hidrosfera, biosfera, la actividad volcánica y las acciones humanas, entre otras. Proponer que el calentamiento promedio del planeta es consecuencia del aumento en los gases de invernadero, particularmente del CO<sub>2</sub> (Mokhov *et al.*, 2005), es reducir la complejidad del clima a simples relaciones causales, ya que las retroalimentaciones entre los elementos del sistema son fundamentales. Sin embargo, muchas de ellas hoy en día, ni siquiera se han planteado porque resulta difícil, luego de haber construido un paradigma matemáticamente elaborado bajo una perspectiva determinista y cimentado en la premisa causa-efecto, aceptar que se deberá cambiar la concepción del análisis para interpretar al clima como un fenómeno enormemente irregular, sujeto a una fuente continua de procesos aleatorios donde las retroalimentaciones lo convierten en un sistema complejo y con un carácter no lineal.

La radiación solar como forzamiento externo, llega en mayor proporción al ecuador térmico, disminuyendo hacia los polos y es el sistema climático, con su intrincada red de retroalimentaciones, quien se encarga de distribuir este calor en el planeta (Yang *et al.*, 2003). Calcular un promedio global de la temperatura sin considerar el tiempo que tarda la dispersión de éste, así como las limitaciones por la heterogénea cobertura espacial y temporal de las estaciones meteorológicas a partir de las cuales se hacen dichos promedios, donde además, no se incluyen las amplias zonas despobladas donde se encuentran las áreas naturales tanto marinas como terrestres, hacen poco consistente dicho promedio, aspecto aún no resuelto con el equipo de medición del que se dispone hoy en día.

Durante las transiciones entre un periodo glacial y uno interglacial o viceversa, el sistema climático se inestabiliza y cada uno de los elementos resuena con distinta frecuencia temporal aumentando con ello la entropía, de manera que la intensidad del estímulo no se traduce necesariamente con la misma intensidad de respuesta; conforme avanza la transición, las interacciones y sus retroalimentaciones tienden a establecer una co-dependencia que les permite alcanzar un nuevo estado de homeostasis o de estabilidad, por lo tanto durante la etapa de la transición todos los elementos ganan información. La dinámica anterior explica no sólo las diferencias entre los periodos glaciales, interglaciales y las transiciones, sino también entre eventos iguales; lo que significa que ninguna glaciación, periodo interglacial o periodo de transición han sido iguales. La evidencia más contundente se manifiesta en la evolución de la biota a lo largo de los diferentes periodos geológicos, cuyo límite está dado por las extinciones biológicas (Agustí, 1996).

## VI. TELECONEXIONES CLIMÁTICAS: GENERADORAS DE VARIABILIDAD EN EL SISTEMA CLIMÁTICO

Una vez establecida la homeostasis durante un periodo interglacial, como el que actualmente vivimos, la intensidad y frecuencia de la variabilidad disminuyen y una de sus manifestaciones son los patrones climáticos de escala planetaria que se reflejan en periodos cortos de uno a varios años, con lluvias o temperaturas anómalas que, de ninguna manera implican un cambio climático y mucho menos aún pueden ser manipulados por la actividad antropogénica debido a la magnitud energética involucrada en ellos. Actualmente se han descrito 17 patrones, llamados oscilaciones planetarias, entre los más analizados están la Oscilación del Atlántico Norte, la Oscilación Decadal del Pacífico, El Niño-Oscilación del Sur y La Niña. Estas oscilaciones se manifiestan como teleconexiones para las que se han definido diversos índices climáticos.

La Oscilación del Atlántico Norte es un subibaja a gran escala que se registra en la presión barométrica de las masas de aire atmosférico, situadas entre dos celdas: la de alta presión subtropical del Atlántico (ubicada en la región de las Islas Azores), a los 38° de latitud Norte y la de baja presión polar del ártico (Islandia) a los 60° de latitud Norte; esta oscilación tiene dos fases que se expresan mayoritariamente en el invierno. La fase positiva sucede cuando las presiones barométricas del anticiclón de las Azores son más altas respecto al valor promedio, mientras que las presiones en Islandia están por debajo de lo normal. La marcada diferencia de presión entre ambas celdas intensifica los vientos del Oeste entre los 50° y 60° de latitud Norte. Produciendo tormentas que cruzan el Atlántico en dirección Noreste; tales tormentas transportan calor desde el océano hasta la parte Noreste de Europa, lo que ocasiona que el tiempo atmosférico en toda la franja geográfica mencionada sea más suave y húmedo, al mismo tiempo que sobre la región mediterránea predomina la sequía y en el caso de las áreas que limitan con la porción Norte del Océano Atlántico (Canadá, Estados Unidos y México) se registra una amplia variabilidad climática.

La Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) es un patrón cíclico de temperatura sobre el Océano Pacífico, descrita en 1996, compuesto por dos fases que abarcan entre 20 y 30 años entre la fase fría y la cálida. Las regiones que parecen influenciar desde el punto de vista de la variabilidad climática son las que se ubican dentro de la Cuenca del Pacífico y el clima de América del Norte.

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es un patrón climático recurrente que implica alteraciones entre 1° y 3°C por encima de lo normal en la temperatura de las aguas oceánicas en la parte central y oriental del Pacífico tropical, en periodos que van de tres a siete años y con una duración de meses hasta dos años. Los incrementos corresponden a la fase cálida (El Niño) y los enfriamientos a la fría (La Niña). Las alteraciones en los patrones térmicos del océano desencadenan importantes fluctuaciones, en cuanto a magnitud se refiere, en los patrones de lluvia de múltiples áreas del planeta tanto del hemisferio norte como del sur.

Entre las diferencias y asociaciones a destacar entre la ODP y el ENSO es que las fases de este último oscilan entre uno y dos años, mientras que las fases de la ODP son del orden de 20 a 30 años. Mientras que el ENSO influye sustancialmente el clima tropical, la ODP afecta el Pacífico Norte y la porción del continente norteamericano. Las alteraciones climáticas más importantes en el continente americano (incluido México) van a suceder cuando ambas oscilaciones (ODP y ENSO) estén en fase. Es decir cuando las fases cálidas de ambas coincidan con eventos El Niño fuertes y las fases frías coincidan con eventos La Niña intensos.

Cualquiera de los patrones mencionados puede activarse por factores externos, como la actividad solar (Kirov y Georgieva, 2002) o internos; dentro de éstos, se considera que el vórtice circumpolar del norte –uno de los 17 patrones– es quien podría desencadenar a los demás (Kirby *et al.*, 2001). De los otros 13 patrones, apenas se conoce su efecto regional, sus mecanismos de teleconexión y, menos aún, tanto su anidamiento con otros patrones, como su efecto en la variabilidad de la lluvia y la temperatura a nivel local y regional.

El vórtice circumpolar registra cambios de dilatación-contracción, cuyo patrón no necesariamente implica la alternancia de las fases, con una duración equiparable entre ellas; la dilatación puede durar uno o varios años y luego presentarse una contracción, sin una regularidad aparente. La falta de regularidad obedece a que una vez que se describe un patrón climático se genera un índice de presión barométrica o de temperatura; a partir de éste y mediante herramientas matemáticas se calculan los índices de teleconexión. De manera que si el índice del patrón tiene unas decenas de años y los ciclos del proceso son mayores, se desconocen tanto su comportamiento como su duración.

Durante la fase de dilatación, el vórtice circumpolar boreal desciende hacia latitudes templadas, disminuyendo la circulación y velocidad de sus vientos. Al dilatarse y descender dichos vientos, comprimen y desplazan hacia el ecuador al intrincado sistema de celdas de circulación, generando en las zonas tropicales y subtropicales condiciones meteorológicas con mayores anomalías en elementos como la lluvia o la temperatura, a través de teleconexiones climáticas. En la fase opuesta, cuando el vórtice se contrae, la circulación circumpolar se intensifica y las condiciones meteorológicas son más moderadas, incluso previsible en las latitudes medias (Kirby *et al.*, 2001). Los efectos en la variabilidad climática durante cualquiera de las fases de vórtice circumpolar boreal, han sido poco explorados en latitudes intertropicales y tropicales.

## VII. ÍNDICES CLIMÁTICOS: UNA HERRAMIENTA PARA ANALIZAR LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LOS ECOSISTEMAS

Es importante ampliar el conocimiento de la escala espacial y temporal dentro de la que ocurre cualquiera de los 17 patrones climáticos ya que, permitirían comprender los diagramas de sierra que se observan en los registros *proxies*; asimismo, cabe destacar que cada localidad responde de manera distinta, dados los factores climáticos que la rodean. Tal y como se observa en el comportamiento de los diferentes índices que se utilizan para evaluar las teleconexiones, los cuales reflejan mecanismos de compensación para equilibrar las fluctuaciones climáticas del planeta; la biota como un elemento más del sistema responde regulando procesos fenológicos, de natalidad, de crecimiento, de reclutamiento o de migración, entre otros, en escalas temporales cortas de horas, días, semanas, meses o incluso, de unos pocos años (Stenseth *et al.*, 2002; Walther *et al.*, 2002). Por otro lado, las diversas extinciones puntuales que actualmente se están registrando en el planeta, son consecuencia de cambios en el uso del suelo, que se traducen en la reducción crítica del espacio para el desarrollo de las poblaciones y del recurso alimenticio del cual se sostienen, sobre todo en aquellas cuya especialización ha alcanzado tal grado que, las limitaciones en su recurso alimenticio le impiden sobrevivir.

## VIII. REFLEXIONES FINALES

Desde una perspectiva humana, el cambio climático es una desviación promedio del tiempo meteorológico esperado, es decir de las condiciones *cuasi*-estables para un lugar y espacio determinados, pero no es totalmente válido promediar las temperaturas de las urbes del planeta por varias razones. Las ciudades no se encuentran ubicadas de forma adyacente formando un colectivo distribuido de manera homogénea en el planeta; ni bajo los mismos factores de latitud, cercanía o lejanía del mar, configuración orográfica, altitud o incluso, características térmicas de las corrientes marinas adyacentes a ellas; por otro lado, el número de registros obtenidos a partir de barcos, satélites y boyas es infinitamente menor respecto al número de estaciones sobre los continentes y podría no ser representativo. Asimismo se carece de una red de estaciones ubicadas en las porciones no habitadas del planeta y por último, existe una irregularidad significativa estadísticamente en la toma de datos de las estaciones, lo que trae consigo discontinuidades en los registros, escalas de medición y heterogeneidad en los instrumentos meteorológicos empleados; en consecuencia, no se puede ni siquiera visualizar el comportamiento de los diversos patrones climáticos, su anidamiento, sus periodicidades, sus teleconexiones y los efectos locales de estas últimas. Por lo que hay un importante grado de incertidumbre dentro de los ámbitos de predicción y prevención de eventuales catástrofes climáticas y justamente la humanidad debería trabajar en disminuir esta incertidumbre.

Por todo lo anterior, una de las tareas fundamentales es la reconstrucción de las series climáticas a partir de herramientas *proxies*, entre las cuales se encuentran los núcleos de hielo, la dendrocronología y los núcleos sedimentológicos; mediante las herramientas *proxies* se pueden llegar a reconstruir, acertadamente, volúmenes de lluvia y valores de temperatura de los últimos 10,000 años. Por último, no debe perderse de vista la necesidad de cambiar la visión determinista basada en la premisa: causa-efecto,

a otra visión que nos permita entender las amplias y aleatorias irregularidades del sistema climático, así como del grave impacto que está ocasionando el cambio en el uso del suelo del planeta.

### RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a CUDI-CONACyT por el financiamiento otorgado para la presente investigación.

### REFERENCIAS

- Acot, P., 2005. *Historia del Clima: desde el Big Bang a las catástrofes climáticas*. Edit. El Ateneo. 268 p.
- Agustí, J., (Ed.), 1996. *La lógica de las extinciones*. Colección Metatemas Serie 42. Tusquets. Barcelona, España. 227 p.
- Barriopedro, D., E. Fischer, J. Luterbacher, R. Trigo y R. García-Herrera, 2011. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 332(6026): 220-224.
- Ceballos, J.R., 2002. *Los árboles, seres vivos para la ciencia*. Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza. España. 2: 1-16.
- Chen, X.L., H.M. Zhao, P.X. Li y Z.Y. Yin, 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104: 133-146.
- Cloern, J., 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210: 223-253.
- Conti, S., P. Meli, G. Minelli, R. Solimini, V. Toccaceli, M. Vichi, C. Beltrano y L. Perini, 2005. Epidemiologic study of mortality during the summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Research*, 98(3): 390-399.
- Córdova, K., 2011. Spatial Geotechnology applied to urban climate studies: Thermal analysis of urban surface and urban land use in the city of Caracas. *Urban Climate News*, 39: 15-21.
- Correa, E.N., S. Flores Larsen y G. Lesino, 2003. Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7(2): 11.25-11.30.
- De la Lanza-Espino, G., J.C. Gómez, M. Blanco, F. Flores y S. Hernández, 2010. Vulnerabilidad costera: caso de estudio del sistema de humedales Marismas Nacionales. In: Rivera, E., I. Azuz, L. Alpuche y G.J. Villalobos (Eds.), *Cambio climático en México: Un enfoque costero y marino*. Universidad Autónoma de Campeche. CETYS-Universidad. Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.
- Díaz, J.L., 2011. *El ábaco, la lira y la rosa: Las regiones del conocimiento*. Fondo de Cultura Económica. Colección La ciencia para todos. México. 268 p.
- Fagan, B., 2008. *El Gran Calentamiento: cómo influyó el cambio climático en el apogeo y caída de las civilizaciones*. Edit. Gedisa. México. 350 p.
- Fortey, R., 2009. Biogeography and evolution in the early Paleozoic. In: Sepkoski, D. y M. Ruse (Eds.), *The Paleobiological revolution: Essays on the growth of modern Paleontology*. The University of Chicago Press. Chicago. 568 p.
- Garduño, R., D. Cruz-Pastrana y A. Tejeda-Martínez, 2005. Paleoclimatic cycles, anthropogenic break



- and global warming? *World Resource Review*, 17(2): 161-167.
- Gil, A. y J. Olcina, 1997. *Climatología general*. Edit. Ariel. Colección Geografía. Barcelona, España. 579 p.
- Holland, J., 1995. *Hidden order: How adaptation builds complexity*. Edit. Perseus. 248 p.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The physical science basis*. WMO. UNEP. 21 p.
- Jáuregui, E., 1993. Algunas alteraciones del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 9(3): 12-24.
- Jáuregui, E., 2000. *El clima de la Ciudad de México*. Temas Selectos de Geografía de México. (I. Textos Monográficos, 4. Urbanización). Instituto de Geografía-Plaza y Valdéz, UNAM, México. 136 p.
- Jáuregui, E., 2009. Las ondas de calor en la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, 70: 71-76.
- Jáuregui, E., J. Cervantes y A. Tejeda, 1997. Bioclimatic conditions in Mexico City – an assessment. *International Journal of Biometeorology*, 40(3): 166-177.
- Jaworowski, Z., 2007. *CO<sub>2</sub>: The greatest scientific scandal of our time*. EIR Science pp. 38-53.
- Kingsford, R., 2000. Ecological impacts of dams, water diversions and river management on floodplain wetlands in Australia. *Austral Ecology*, 25(2): 109-127.
- Kirby, M., H. Mullins, W. Patterson y A. Burnett, 2001. Lacustrine isotopic evidence for multidecadal natural climate variability related to the circumpolar vortex over the northeast United States during the past millennium. *Geology*, 29(9): 807-810.
- Kirov, B. y K. Georgieva, 2002. Long-term variations and interrelations of ENSO, NAO and solar activity. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 27(6-8): 441-448.
- Köppen, W., 1948. *Climatología: con un estudio de los climas de la Tierra*. Edit. Fondo de Cultura Económica. Buenos Aires. 478 p.
- Kröpelin, S., D. Verschuren, A.-M. Lézine, H. Eggermont, C. Cocquyt, P. Francus, J.-P. Cazes, M. Fagot, B. Rumes, J.M. Russell, F. Darius, D.J. Conley, M. Schuster, H. von Suchodoletz y D.R. Engstrom, 2008. Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years. *Science*, 320(5877): 765-768.
- Lovelock, J., 2005. *Homenaje a GAIA: La vida de un científico independiente*. Oxford, University Press. 547 p.
- Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático, 1992. *Documento Normativo*. s/p.
- Meehl, G. y C. Tebaldi, 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st Century. *Science*, 305(5686): 994-997.
- Mokhov, I., V. Bezverkhny y A. Karpenko, 2005. Diagnosis of relative variations in atmospheric greenhouse gas contents and temperature from Vostok Antarctic ice-core paleoreconstructions. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 41(5): 523-536.
- Monnin, E., A. Indermühle, A. Dällenbach, J. Flückiger, B. Stauffer, T.F. Stocker, D. Raynaud y J.-M. Barnola, 2001. Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations over the last glacial termination. *Science*, 291(5501): 112-114.

- Murphy, J., D. Sexton, D. Barnett, G. Jones, M. Webb, M. Collins y D. Stainforth, 2004. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*, 430: 768-772.
- Olgay, V., 2005. *Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Edit. Gustavo Gili. Barcelona, España. 203 p.
- Organización Meteorológica Mundial, 2007. *Función de las Normales Climatológicas en un clima cambiante*. WCDMP-Nº. 61. OMM-TD No. 1377. Ginebra, Suiza. 43 p.
- Pearson, P. y M. Palmer, 2000. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. *Nature*, 406: 695-699.
- Rial, J., 2004. Abrupt climate change: chaos and order at orbital and millennial scales. *Global and Planetary Change*, 41(2): 95-109.
- Rigozo, N.R., A. Prestes, D.J.R. Nordemann, H.E. da Silva, M.P. Souza Echer y E. Echer, 2008. Solar maximum epoch imprints in tree-ring width from Passo Fundo, Brazil (1741-2004). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70(7): 1025-1033.
- Ritter, W., S. Guzmán, N. Sánchez-Santillán, J. Suárez, C. Corona, H. Muñoz, A. Ramos, R. Rodríguez y T. Pérez, 2002. El clima como sistema complejo adaptativo en coevolución. *Ciencia y Mar*, VI(17): 23-35.
- Ritter, W. y T. Pérez, 2010. ¿Qué es el cambio climático y qué tan efectivo es su pronóstico? *Globalización*, Abril, 2010 (revista digital) <http://rcci.net/globalizacion/2010/fg981.htm>.
- Sánchez-Santillán, N., M. Signoret y R. Garduño, 2006. La Oscilación del Atlántico Norte: un fenómeno que incide en la variabilidad climática de México. *Ingeniería: Investigación y Tecnología*, VII(2): 85-95.
- Sánchez-Santillán, N. y R. Garduño, 2007. El clima, la ecología y el caos desde la perspectiva de la teoría general de sistemas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, VIII(3): 183-195.
- Sánchez-Santillán, N. y G. de la Lanza-Espino, 2012. Cambio o variabilidad climática: un problema semántico con graves consecuencias. In: Ramírez-León H., J.M. Navarro-Pineda y H.A. Barrios-Piña (Eds.), *Dinámica ambiental de ecosistemas acuáticos costeros. Elementos y ejemplos prácticos de diagnóstico*. pp. 49-66. Instituto Politécnico Nacional. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Politécnico Nacional, Asociación Mexicana de Infraestructura Portuaria, Marina y Costera AC, Sociedad de Egresados de Ingeniería Civil del Instituto Politécnico Nacional, México. 680 p.
- Stenseth, N., A. Mysterud, G. Ottersen, J. Hurrell, K.-S. Chan y M. Lima, 2002. Ecological effects of climate fluctuations. *Science*, 297(5585): 1292-1296.
- Usó, J.L. y J. Mateu, 2004. *Teoría del medio ambiente: Modelización*. Universitat Jaume. Sèrie 3 Medi ambient. 315 p.
- Vázquez, L.A., 2006. La incertidumbre de las catástrofes climáticas. *Ingeniería y Territorio*, 74: 36-41.
- Wallén, C., 1986. Impact of present century climate fluctuations in the Northern Hemisphere. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 68(4): 245-278.
- Walther, G.-R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. Beebee, J.-M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg y F. Bairlein, 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416: 389-395.

- Wanner, H., S. Brönnimann, C. Casty, D. Gyalistras, J. Luterbacher, C. Schmutz, D. Stephenson y E. Xoplaki, 2001. North Atlantic Oscillation - Concepts and studies. *Surveys in Geophysics*, 22(4): 321-382.
- World Health Organization, 2009. Consultado: Junio 2012. Disponible en: <http://www.who.int/en/>.
- Yang, P., J. Bian, G. Wang y X. Zhou, 2003. Hierarchy and nonstationarity in climate systems: Exploring the prediction of complex systems. *Chinese Science Bulletin*, 48(19): 2148-2154.
- Zhang, Q., M. Gemmer y J. Chen, 2008. Climate changes and flood/drought risk in the Yangtze Delta, China, during the past millennium. *Quaternary International*, 176-177: 62-69.
- Zhuravlev, Y.N. y V.A. Avetisov, 2006. The definition of life in the context of its origin. *Biogeosciences*, 3: 281-291.