

Estado de la investigación de los aspectos físicos del cambio climático de México

Adalberto Tejeda Martínez*
Luis Rodríguez Viqueira**

Recibido: 2 de enero de 2006
Aceptado en versión final: 26 de junio de 2006

Resumen. Se hace una descripción del estado que guarda la investigación sobre cambio climático (cc) en México y su evolución desde la década de los ochenta. Se mostrará que se han integrado grupos de trabajo y proyectos ambiciosos que permiten tener ya una visión integrada –aunque incierta– de sus posibles consecuencias para México. Destaca una explosión en la producción de trabajos en la década de los noventa, cuando el tema se vuelve prioridad en varias partes del mundo y en México se realiza el llamado *Estudio de País*.

Se identificaron los grupos de trabajo en el país. Se revisaron 323 fichas de libros y capítulos de libros (12%), artículos *in extenso* en memorias de congresos (40%), artículos en revistas (38%) y tesis (10%).

En el 2002, la investigación formal en cc en México estaba centrada en un 90% en instituciones académicas (46 en total, 43 nacionales y tres internacionales), y muy reducidamente en las empresas.

Palabras clave: Cambio climático, México, conocimiento.

Art state of the research on physical aspects of climate change in Mexico

Abstract. This paper reviews the situation and the evolution of the climate change subject in Mexico. From 1980 decade, diverse research centers in the country have been led to study so much the physical aspects as the social ones of the phenomenon. Work groups have integrated themselves and ambitious projects that allow to already have an integrated vision –although still uncertain– of its possible consequences for Mexico. It was clear an explosion in the production of works in the nineties, when the subject becomes priority in several parts from the world and in Mexico of it makes the *Study of Country*.

* Climatología Aplicada, Licenciatura en Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.
E-mail: atejeda@uv.mx

** Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 México, D. F. E-mail: lrv@pumas.ii.unam.mx

The work groups in the country were identified and the authors reviewed 323 book cards and chapters of books (12%), articles in extensive in memories of congresses (40%), articles in magazines (38%) and thesis (10%).

Key words: Climatic change, Mexico, knowledge.

INTRODUCCIÓN

Desde que el tema del cambio climático (cc) se puso de moda en la década de los ochenta, diversos centros de investigación en el país se han abocado a estudiar tanto los aspectos físicos como los sociales del fenómeno. Se han integrado grupos de trabajo y proyectos ambiciosos que permiten tener ya una visión integrada –si bien aún incierta– de sus posibles consecuencias para México. En la esfera de los aspectos físicos o medioambientales, dos son las causas de cambios climáticos cuyo estudio ha despuntado con mayor vigor en relación con este territorio: el posible cambio por incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) –el considerado cambio climático global antropogénico– y las alteraciones debidas a la urbanización. Otras causas, como el vulcanismo, las variaciones en la órbita terrestre o la deforestación, han sido estudiadas con menor amplitud.

Este artículo mostrará una radiografía de los grupos de trabajo en el país, el cuerpo de conocimientos que están generando, y se completará con las opiniones recabadas entre nueve investigadores. Se pretende aproximarse a un diagnóstico para valorar incertidumbres y enfocar futuras investigaciones.

México, al igual que diversos países, necesita revisar el estado del conocimiento en cuanto a cambio climático para enfocar nuevos proyectos de investigación, por una parte, y para implementar políticas de mitigación y adaptación, por la otra. De este modo, este trabajo comprende tres diagnósticos fundamentales: la identificación de grupos de trabajo, la revisión de bibliografía y la consulta con expertos, que se describen a continuación.

GRUPOS DE TRABAJO

En un inventario de grupos o individuos potenciales estudiosos del cambio climático en México, la UNAM (2001) detectó que la mayor parte de los investigadores están adscritos a instituciones de investigación públicas, privadas y paraestatales, mientras que en las empresas y en la mayoría de los organismos privados y sociales la relación con el tema es generalmente marginal, aunque se observa que canalizan sus preocupaciones hacia la participación en el diseño de lineamientos de política. El 74% de los contactos se dedican a la investigación formal en instituciones educativas y de investigación (247), a los que se añaden pocos actores adscritos a instituciones públicas, privadas y sociales para dar un total de 332 investigadores, concentrados, principalmente, en el Distrito Federal (Tabla 1). La mayor parte de los contactos estatales se encuentran en Baja California, Baja California Sur, Morelos, Estado de México, Chihuahua, Veracruz y Yucatán, pero en nueve estados sólo existe un contacto, mientras que en otros nueve no se encontraron contactos.

La investigación formal en cambio climático está concentrada en un 90% en instituciones académicas (públicas, paraestatales y privadas; 46 en total, 43 nacionales y tres internacionales). Es de notarse el reducido número de contactos asociados a cada grupo de investigación (1.7 en promedio). En 19 instituciones existe un solo contacto.

La UNAM (2001) encontró 45 organismos que proveían financiamiento para investigaciones sobre el cc, recayendo el mayor peso de la inversión en dependencias de gobierno (aunque sólo cuatro Secretarías con un interés activo),

pero en el total había un 42.5% de financiamiento internacional.

De las 46 instituciones que realizan investigación formal en cambio climático, 29 trabajan sobre vulnerabilidad, mientras que 14 sobre política y economía, diez en variabilidad climática, diez en observación del fenómeno y nueve en mitigación. Los temas de cambio climático general, opciones de adaptación y actividades de apoyo están concentrados en sólo seis instituciones.

La mayor parte de los 253 investigadores ubicados en las distintas instituciones realizan trabajos relacionados con la vulnerabilidad (47.4%) en el 64.4% de las instituciones de investigación formal. Los temas de estudio y observación del fenómeno, mitigación, política y economía del cambio climático y variabilidad climática, cuentan con 30 investigadores cada uno; número relativamente bajo si se compara con los 120 que se dedican a vulnerabilidad.

El estudio y la observación del fenómeno y las evaluaciones de vulnerabilidad ante el cambio climático constituyen una primera fase del problema, mientras que las políticas

comprenden los lineamientos de acción y, a su vez, las medidas de mitigación y las opciones de adaptación son el objetivo final para reducir o evitar sus efectos. En este sentido es notable la baja proporción de contactos e instituciones que se enfocan a estas dos últimas líneas.

En mitigación los trabajos obedecen a criterios de ahorro energético más que a la atenuación de los efectos directos de cc, y se encuentran concentrados en ocho de las 46 instituciones de investigación con alrededor de 34 investigadores, diez de ellos en el tema de la captura de carbono.

Con enfoques que van de la vulnerabilidad hasta la mitigación, 16 investigadores se dedicaban en el 2001 a la incidencia del cambio climático en la salud humana.

Si bien hay una diversidad de investigaciones directamente relacionadas con impactos del cambio climático en actividades productivas (en la producción pesquera, desertificación y agricultura, salvaguarda de los bosques), otras se enfocan en el desarrollo de metodologías e indicadores que puedan ayudar a evidenciar la forma en que está originándose el cambio

Tabla 1. Líneas de investigación formal de instituciones y número de grupos o personas (contactos) involucrados en el tema

	Instituciones formales*	Número de contactos	
Vulnerabilidad	29	120	47.4 %
Política y economía	14	29	11.5 %
Estudio y observación del fenómeno	11	34	13.4 %
Variabilidad climática	10	26	10.3 %
Mitigación	9	35	13.8 %
Cambio climático	3	5	2.0 %
Opciones de adaptación	2	3	1.2 %
Actividades de apoyo	1	1	0.4 %
Suma	79	253	100 %

* Las Instituciones cultivan más de una línea.

climático y en la elaboración de los inventarios de emisiones de GEI. En términos porcentuales destacan investigadores en ecología y biodiversidad (11.2%), clima y atmósfera (8.8%); economía (7.5%); aspectos sociales (7.2%); zonas marinas (6.9%) y recursos hídricos (6.7%).

Estudios

Se describirán los estudios sobre aspectos físicos o medioambientales del cambio climático de México, que estricta y directamente se ocupen de este tópico. La bibliografía especializada en muy diversas ramas del conocimiento –desde la geofísica hasta la adopción de fuentes renovables de energía, desde la química ambiental hasta la paleontología física– está plagada de fichas que pueden asociarse a estos temas, pero en este punto se planteará un diagnóstico de productos directamente vinculados al cambio climático y no del potencial de investigación. El resultado es un acervo –desde luego más extenso que las referencias que aquí se comentan– constituido por 323 fichas de libros y capítulos de libros (12%), artículos in extenso en memorias de congresos (40%), artículos en revistas (38%) y tesis (10%). La indagación se realizó en bibliotecas de la Ciudad de México y a través de Internet, por lo que seguramente hay un número importante de trabajos que quedaron fuera de esta base de datos al no haberse detectado en dichas fuentes.

En una visión cronológica destaca una explosión en la producción de trabajos en la década de los noventa, cuando el tema se vuelve prioridad en varias partes del mundo y en México se realiza el llamado *Estudio de País, México; México ante el Cambio Climático* (Tabla 2).

Por otra parte, las fichas recopiladas se agruparon en once temas:

- *Asentamientos humanos y clima*: engloba a documentos que tratan de los posibles efectos del cambio climático en los asentamientos humanos, o del impacto de la urbanización en el clima (climatología urbana).
- *Agro-bosques-vegetación*: estudios que exploran el efecto del cambio climático en agricultura, bosques o vegetación.
- *Ecosistemas*: implicaciones del cambio o variabilidad en ecosistemas terrestres o acuáticos, sin considerar bosques.
- *Emisiones*: se refiere a estudios sobre emisiones de gases de efecto invernadero, o su posible reducción o mitigación por fuentes alternas de energía o plantaciones (por lo tanto, algunos textos sobre manejo de bosques para atrapar bióxido de carbono se agregan aquí y no se incluyen en el apartado de *Agro-bosques-vegetación*).
- *Energía*: estudios de prospección en la producción o necesidades energéticas del futuro.

Tabla 2. Porcentajes de estudios de aspectos físicos del cambio climático en México en distintos períodos

Período	Núm. de trabajos	Porcentaje
1960-1979	12	4
1980-1993	81	25
1994-1995	72	22
1996-2000	64	20
2001-2004	94	29
Total	323	100

- *General*: obras –principalmente libros– que contienen dos o más enfoques y varios temas.
- *Hidrología*: consecuencias del cambio o la variabilidad del clima en la cantidad o distribución temporal de precipitaciones y cuerpos de agua superficiales.
- *Nivel del mar*: escenarios o evidencias de elevación del nivel del mar por cambio o variabilidad climática.
- *Modelado*: uso, adaptación o evaluación de modelos climáticos o análisis de datos paleoclimáticos.
- *Suelos*: deterioro de los suelos por variabilidad o cambio climático.
- *Variabilidad*: estudios que tratan sobre la detección de fluctuaciones o variaciones climáticas en el orden de décadas.

En la Tabla 3 se resalta la cantidad de trabajos sobre asentamientos humanos debido al desa-

rollo en el país de varios grupos que trabajan en climatología urbana. También, y de manera natural, las principales preocupaciones en torno al cambio climático han sido la agricultura y los bosques.

Las fichas también fueron clasificadas en cuanto a su enfoque (Tabla 3). Para los casos en que los estudios no llegan a diagnosticar al menos la vulnerabilidad ante el cambio o la variabilidad climáticos, se les denominó simplemente como de *evaluación* (es decir, la fenomenología de ese cambio o esa variabilidad), mientras que los siguientes peldaños (vulnerabilidad, mitigación o adaptación), necesariamente tienen implícitas las etapas anteriores. Es claro que la mayor dificultad en la incorporación de medidas de mitigación o adaptación, hacen que estos enfoques sean minoritarios. En la mayoría de los casos domina la evaluación –o fenomenología– excepto en los estudios de ecosistemas y agro-bosques y vege-

Tabla 3. Porcentajes de trabajos sobre distintos temas en estudios de aspectos físicos del cambio climático en México

Tema	Adaptación	Mitigación	Vulnerabilidad	Evaluación	Núm. de Trabajos	%
Agro-bosques-vegetación	2	4	35	8	49	15
Asentamientos humanos y clima	0	2	10	63	75	23
Ecosistemas	0	0	19	3	22	7
Emisiones	0	35	3	28	66	20
Energía	1	10	2	35	48	15
General	0	0	0	6	6	2
Hidrología	0	0	4	3	7	2
Modelado	1	0	6	21	28	9
Nivel del mar	1	0	4	2	6	2
Suelos	0	0	2	1	3	1
Variabilidad	1	0	3	8	13	4
Total	6	51	88	178	323	100

tación (en los que domina la vulnerabilidad) y en las emisiones, que llegan hasta propuestas de mitigación.

Debe considerarse que no obstante su baja frecuencia, la modelación es un tema que prácticamente detonó el interés por el cambio climático, y se siguen ensayando esquemas y modelos para aumentar la confiabilidad de los escenarios de climas futuros, mientras que las estimaciones de emisiones de gases de invernadero igualmente constituyen un tema recurrente en los estudios de cambio climático en México.

Sinopsis de las publicaciones

Los primeros escenarios climáticos –es decir, no de impactos– de cambio climático sobre México, probablemente sean los de Mendoza *et al.* (1994) y los de Magaña (1994) y su secuela (Conde *et al.*, 1995; Magaña, 1995 y Magaña y Conde 2003, Conde, 2003). A partir de aplicar modelos de circulación general de la atmósfera (los llamados GFDLR30 y CCCM), han estimado un incremento en la temperatura ambiente de 2 a 3° C para condiciones de duplicación del dióxido de carbono atmosférico. A partir de estos resultados –coincidentes con los estimados por el IPCC para el resto del planeta– se han generado escenarios de impacto en diversos medios (bosques, ecosistemas, cultivos, asentamientos humanos y nivel del mar, entre otros). Éstos revelan una vulnerabilidad importante en varias regiones del país, debido tanto a las condiciones biofísicas locales como a las características poblacionales, que determinan elevados riesgos económicos, sociales y ambientales.

La modelación de los procesos de cambio climático que permite a los climatólogos inferir las condiciones futuras se corrobora en estudios paleoclimatológicos, como el realizado en el área norte de la cuenca de México, sobre el análisis de la intensidad de la energía pluvial hecho para establecer un diagnóstico de los cambios paleoclimáticos (Meza y Cervantes, 1981).

Un ejemplo ilustrativo de los efectos del cambio climático en los climas regionales del país, se aprecia en las tendencias climáticas de la región centro del estado de Veracruz, en las que se obtiene un aumento en los eventos extremos de temperatura y precipitación (Palma, 2003; Hernández *et al.*, 2003) y en las tendencias estimadas para el 2025, cuando se perfilan cambios en el subtipo de clima de tres lugares del estado, dos de ellos con mayores precipitaciones anuales (Martínez de la Torre y Atzalan) y el otro con un incremento en su temperatura media anual de Las Vigas de Ramírez (Palma, 2003).

Las fluctuaciones de los eventos extremos de una región dada modifican el ciclo hidrológico y el balance térmico, afectando de esta forma a la actividad agrícola (Liverman, 1992; Ferrer *et al.*, 1995). La vulnerabilidad de este sector se ilustra en los escenarios de no adaptación de cultivos de café (Gay *et al.*, 2003) y maíz (Conde y Eakin, 2003).

Debido a que los elementos de biodiversidad responden íntimamente al clima, cualquier variación afecta a los diversos ecosistemas. Los estudios de respuesta de los bosques frente a cambios ambientales muestran gran sensibilidad en las áreas naturales protegidas, en los ecosistemas forestales naturales y en las zonas de explotación forestal (Villers y Trejo, 1998). Esto es ratificado en los estudios de Halffter (1992), los cuales diagnostican pérdidas de los bosques templados fríos y semicálidos; y cambios en la distribución de los bosques tropicales secos, muy secos y espinosos que ocuparían mayores superficies que en la actualidad. Así mismo, las especies faunísticas se verían afectadas o desaparecerían hasta en un 40% (Peterson *et al.*, 2002), lo que resultaría en un desequilibrio ecológico.

La mayoría de los estudios realizados sobre el cambio climático y su relación con los ecosistemas forestales y áreas naturales protegidas, están más bien dirigidos hacia el papel que juegan los ecosistemas como fuentes de emisión o captación de carbono (Masera *et al.*,

1992; Masera *et al.*, 1997; Sathaye *et al.*, 2001; Bellon, 1993).

También las zonas costeras presentan una gran vulnerabilidad al aumento en el nivel del mar, como respuesta a un incremento en la precipitación media anual. El trabajo de Ortiz (1994) proporciona evidencias del hundimiento de una porción del litoral, y mediante la caracterización geomorfológica del litoral Ortiz y Méndez (1995) identifican las áreas más vulnerables a las variaciones del nivel del mar y estiman las áreas de impacto por inundación. El aumento en el nivel del mar además de afectar a los asentamientos humanos tiene un efecto negativo en los frágiles ecosistemas de estuarios y manglares, debido a la salinización del suelo.

El clima de una región se modifica en gran medida a causa del cambio del uso de suelo (*p.e.* crecimiento de centros urbanos), pero también el cambio del uso de suelo es un efecto del cambio climático (*e.g.* cultivos que se dan en zonas cálidas se darán en zonas templadas que pasarán a ser cálidas). Los suelos merecen un examen cercano debido a su gran potencial en la mitigación del carbono (Hernández-Tejeda, 1994; García y Masera, 2003). La concentración de concreto, grandes edificios, y otras actividades humanas elevan artificialmente las temperaturas urbanas. Un caso de estudio interesante es el realizado para la zona centro y occidente de la Ciudad de México, en el que se observan mayores temperaturas dentro de la ciudad que en los alrededores (fenómeno llamado isla de calor) así como un crecimiento de la evaporación como consecuencia de la isla de calor, resultado del acelerado crecimiento urbano de la ciudad (Jáuregui y Luyando, 1998). El incremento de temperatura producto de la combinación del efecto invernadero y la urbanización (Jáuregui *et al.*, 1992) se confirma en los estudios de Jáuregui (1995), Jáuregui *et al.* (1997) y Jáuregui y Tejeda (2001) sobre las condiciones de bioclima humano, realizados para diferentes puntos de la República, en los cuales se expone que la afectación principal

será en la estación cálida. Este aumento en la temperatura implica un consumo de energía para enfriamiento superior al ahorro energético por calefacción en el invierno (Tejeda y Rivas, 2002); cambios en el confort, la salud y la productividad (Aguilar, 1995; Tejeda y García, 2002).

La urbanización también influye en el régimen de precipitación, sustentado en la tendencia significativa de aumento en los niveles de precipitación en un área urbana de la Ciudad de México (Tacubaya; Jáuregui y Romales, 1996).

Frente a una amenaza como la que apunta el cc, se han realizado estudios sobre estrategias de mitigación en las concentraciones de GI en la atmósfera. Indudablemente, el desafío consiste en desarrollar y difundir tecnologías innovadoras, en especial en el campo energético. En este proceso, los recursos energéticos juegan un papel doblemente estratégico, ya que México no sólo es un país consumidor de energía sino que también es un importante productor y exportador de hidrocarburos, principalmente de petróleo y gas natural.

Las emisiones de GI están directamente ligadas al consumo de la energía en México, lo que se traduce en una fuente de contaminación del aire (Martínez, 1992). El cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero debidas al consumo de energía con la metodología "bottom-up" (Sheinbaum y Rodríguez, 1994), indica que además del combustible utilizado para la generación de energía, existe la industria del hierro y el acero, la petroquímica, la química básica, el cemento (Sheinbaum y Ozawa, 1998), las pastas, el papel y el vidrio que contribuyen fuertemente en el incremento de emisiones de bióxido de carbono.

Debido a que a mayor consumo de energía mayor liberación de CO_2 , Manzini y Martínez (1999) proponen un plan de desarrollo sustentable del consumo, uso y producción de energía a nivel nacional. También Sheinbaum *et al.* (1998) generaron escenarios de reducción en las emisiones de CO_2 para el 2005 con una

relación directa entre la generación industrial de energía y la eficiencia luminosa. Siguiendo este plan estratégico la reducción de CO₂ sería del 13%.

También existen estudios sobre medidas de mitigación del carbono, como los de Mendoza *et al.* (2003) y Sheinbaum *et al.* (1997) que muestran la posibilidad de mantener en niveles constantes la relación consumo de energía y emisiones de carbón, mediante el uso eficiente de energía, el aprovechamiento de fuentes renovables de energía, evitando la deforestación a través del manejo de bosques naturales y manejando dos opciones de reforestación como restitución de árboles y sistemas agroforestales.

Uno de los trabajos sobre adaptación en cultivos alternos de temporal, revela una no adaptación al medio, ya que reflejan la alta variabilidad de la precipitación regional de un año a otro, fracasando para el proyecto de tres regiones del estado de Tlaxcala (Orozco, 2004).

Con la baja predictabilidad de la variabilidad climática para escenarios proyectados de dos a cinco años y la escasez de trabajos sobre adaptación, es evidente que la única vía para mitigar los impactos del cambio climático es disminuir las emisiones de CO₂ hasta niveles que retrasen estos impactos de modo que las poblaciones y los ecosistemas tengan tiempo suficiente para desarrollar estrategias de adaptación proporcionales a las emisiones de gases de invernadero.

Opiniones de expertos

Con objeto de completar y contrastar la información inferida de las publicaciones, se encuestó a veinte expertos en cambio y variabilidad climáticos. Diez de ellos respondieron, y a continuación se presentan las respuestas a cuatro cuestiones centrales de la investigación sobre el tema en México.

a) *¿Cuáles son los aspectos mejor documentados sobre estos temas en nuestro país?*

Para algunos investigadores^[1,2,3] es la variabilidad, aunque aclaran que faltan estudios a escala regional. Otro grupo menciona que los trabajos en relación a emisiones son los mejor documentados, como se ve en la relevancia que tienen en las llamadas Primera y Segunda Comunicación Nacional –y en textos internacionales– amén de su relación con actividades antropogénicas y el desarrollo del país (energía, agricultura, deforestación y urbanización).^[4,5,6,7] También mencionan que se cuenta con información adicional sobre hidrología, flora y fauna que muestran evidencias de la evolución del clima en las últimas décadas.^[8] Sin embargo, Ruiz Barradas^[9] incita a la reflexión, al afirmar que los estudios sobre variabilidad o cambio climático no serán de gran utilidad si no se conoce de antemano la variabilidad “natural” del clima nacional en las diferentes escalas temporales (estacional, interanual, decadal y secular), ya que el cambio climático se estudia a través de modelos del clima cuya eficiencia se basa en la mejor simulación de dicha variabilidad. Rosenhaus^[10] pone énfasis en la necesidad de estudiar diagnóstico a partir de datos confiables.

b) *¿Cuáles son los aspectos que deberían investigarse en el corto plazo (próximos tres años), de manera urgente? ¿Desde qué enfoque?*

Los expertos sugieren que antes de definir las líneas de investigación se debe coordinar mejor la investigación en la materia a través de un programa nacional^[4] y obtener un banco de datos climáticos confiables, tanto mensuales como diarios,^[6,9] pues aunque se cuente con los datos de reanálisis (en su mayoría son datos globales) éstos deben ser cotejados con datos observados. Ahora bien, en términos de prioridades las opiniones apuntan hacia estudios de:

i) Evaluación de las condiciones climáticas y ambientales actuales (calidad del aire y agua, e inventarios de GEI, principalmente para el sector forestal sobre el que hay mayor incertidumbre) a escala regional y en-

- focados a las necesidades nacionales (áreas críticas, énfasis en riesgos, variabilidad climática y eventos extremos), comenzando por aquellas partes donde se anticipa un cambio climático más acentuado.^[6,1,2,7,4]
- ii) Variabilidad natural del clima, con el propósito de saber cuáles son los fenómenos externos que más influyen en la modulación de éste en el país; análisis de vulnerabilidad presente con el fin de desarrollar estrategias para su reducción; variaciones del clima urbano en las ciudades grandes (México, Guadalajara, Monterrey, Tijuana y otras) en relación con la contaminación física y química de las cuencas atmosféricas de las zonas metropolitanas; y cálculos cuantitativos de la tendencia climática en los patrones de precipitación y su correlación con la circulación atmosférica de macroescala con fin de pronóstico a largo plazo (para fines agrícolas, de operación de las presas, sistemas de drenaje y alcantarillado).^[3,6,8,7,10]
 - iii) Medidas de mitigación de emisiones futuras (reducción de emisiones por sector evaluando el costo-beneficio) que concluyan en estudios de adaptación a los impactos socioeconómicos de la variabilidad y cambio climático en recursos naturales, actividades y zonas económicas críticas.^[9,1,5] En otras palabras, ligar al cambio climático con estrategias de desarrollo sustentable, como hacer la adaptación y mitigación del cambio climático un subproducto de estrategias más generales de desarrollo sustentable para el país.^[4]
 - iv) Integración de los resultados de los puntos anteriores para planear sobre el tema, con ingerencia nacional,^[1,5] ligando mitigación y adaptación desde un enfoque interdisciplinario, inclusive en la modelación para la generación de escenarios.^[4]

c) *¿Cuáles son los aspectos que deberían investigarse en el mediano plazo (próximos diez años)? ¿Desde qué enfoque?*

Los entrevistados sugirieron:

- i) Enfrentar el tema del agua desde todos los ángulos posibles, ya que México es especialmente vulnerable ante la escasez o exceso de agua.^[10,5,6]
- ii) Analizar con mayor detalle cómo impactará el cambio climático al país a escala regional, a partir de: a) elaboración de pronósticos estacionales; b) estudios sobre la evolución de eventos extremos (por ejemplo, lluvias intensas, altas temperaturas y ondas de calor) en series largas disponibles de ciudades medias y grandes del país;^[2,10] c) establecer la relación de la precipitación y la temperatura con las oscilaciones de baja frecuencia (El Niño-Oscilación del Sur, Oscilación Decadal del Pacífico,^[6,3] Oscilación del Atlántico Norte) y cuasi-bienal (Madden Julian^[9]); d) modelos climáticos (circulación general, modelos simples, regionales, nacionales, regionales a nivel de país y locales) con visión general para una perspectiva completa del fenómeno.^[1]
- iii) Construir escenarios de cambio climático nacionales, regionales, locales y sectoriales y sus posibles consecuencias (por ejemplo que muestren los cambios esperados en los patrones de producción en zonas agropecuarias y los efectos en los asentamientos humanos, incluida la migración y la salud,^[1,8] considerando qué se podría hacer en conjunto para mitigarlas y adaptarlas; asimismo calcular el costo-beneficio social y económico del cambio y la variabilidad climáticos^[5,1] incluyendo la incorporación de servicios ambientales (pago por bonos de carbono) para incentivar las opciones de mitigación del cambio climático.^[4]
- iv) Desarrollar estrategias para educar a la población (nuevas generaciones principalmente^[9]) y establecer tácticas para incentivar la participación privada y social (regulación del cambio de uso de suelo y el desarrollo comunitario,^[1] con el firme

propósito de concientizar para vivir con un *veleidoso clima*.

d) De trabajos realizados para otras regiones del mundo ¿hay alguno que se recomiende ampliamente por su metodología o perspectivas para que pueda aplicarse a México?

Antes que sugerir alguna adaptación de trabajos internacionales al país, algunos entrevistados proponen las siguientes recomendaciones:

i) crear un plan ambiciosos de formación de recursos humanos;^[6] ii) analizar la información disponible (publicaciones y reportes científicos);^[5] iii) delinear áreas prioritarias y estrategias de investigación;^[7] iv) establecer proyectos multidisciplinarios, con base en lo anterior, con la intención de atacar los problemas de forma integral.^[5]

Por otro lado, la diversidad de opiniones revela como fuente de inspiración: *i) los estudios realizados en Nordeste, Brasil (sustentados en la variabilidad natural del lugar);^[9] ii) los artículos de Gershunov sobre la "Oscilación Decadal del Pacífico";^[6] iii) los trabajos generados por el IPCC en su tercer reporte, complementados con los Estudios de País que se envían al UNFCCC.^[11,1,12]*

COMENTARIOS FINALES

Salta a la vista que hay una masa crítica de grupos de investigación sobre el tema, pero con una cantidad insuficiente en la modelación y en el estudio de evidencias del cambio climático, temas que sustenten el resto de la investigación en la materia. No obstante las capacidades instaladas, hay que potenciarlas mediante acciones como las siguientes:

a) Organización de un foro de presentación y discusión de diagnóstico y propuestas en el que participen representantes de los

grupos identificados en este documento; del sector privado y de organizaciones civiles involucradas en el tema.

b) Lanzamiento de convocatorias de investigación en torno al cambio climático mediante los diferentes fondos que instituciones nacionales (CONACYT, p.e.) tienen destinados a investigación.

c) Impulso a la firma de convenios con organizaciones y fundaciones internacionales que financien investigación en la materia.

d) Creación y mantenimiento de una red nacional de estudiosos de cambio climático, que tendría entre otras funciones: i) informar sobre eventos, publicaciones y convocatorias; ii) facilitar tanto la organización de seminarios y encuentros como el intercambio de información sobre publicaciones y datos estadísticos; iii) desarrollar infraestructura física y humana con participación de las disciplinas académicas de interés; iv) avanzar en la descentralización de la investigación en temas de variabilidad y cc, sus causas y efectos, v) realizar al menos una reunión anual sobre cambio climático donde se presenten los últimos avances de investigación en la materia, y vi) discutir y diseñar estrategias de mitigación y adaptación.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue patrocinado por el Instituto Nacional de Ecología de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) del Gobierno de México. Los autores agradecen el apoyo por parte de Laura Jiménez Lagunes, Daniela Cruz Pastrana, Beatriz E. Palma Grayeb y Alberto Utrera Zárate.

NOTAS

¹ Edmundo de Alba, Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, edea@servidor.unam.mx

² Ernesto Jáuregui, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, ejos@atmosfera.unam.mx

- ³ Irina Tereshchenko, Departamento de Física, UDG, itershcc@ccip.udg.mx
- ⁴ Omar Masera, Instituto de Ecología, UNAM, Campus Morelia, omasera@oikos.unam.mx
- ⁵ Carlos Gay, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, cgay@servidor.unam.mx
- ⁶ Edgar Pavía, Departamento de Oceanografía Física, CICESE, epavia@cicese.mx
- ⁷ Víctor Magaña, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, victormr@servidor.unam.mx
- ⁸ José Luis Fernández Zayas, Instituto de Ingeniería, UNAM, JFernandezZ@iingen.unam.mx
- ⁹ Alfredo Ruiz Barradas, Departamento de Meteorología, Universidad de Maryland, alfredo@atmos.umd.edu
- ¹⁰ Michel Rosengaus, Servicio Meteorológico Nacional.
- ¹¹ The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ¹² United Nations Framework Convention on Climate Change.
- REFERENCIAS**
- Aguilar, G. A. (1995), "Crecimiento y distribución regional de los asentamientos humanos en México. Condiciones de vulnerabilidad al cambio climático", *Memorias del Segundo Taller de "Estudio de País: México"*. México ante el Cambio Climático, Cuernavaca, Morelos, 8-11 de mayo, México, pp. 243-250.
- Bellón, M. R., O. Masera and G. Segura (1993), *Response options for sequestering carbon in Mexico's forests*, Centro de Ecología, UNAM, México.
- Caballero, M., G. Vilaclara, A. Rodríguez and D. Juárez (2003), "Short-term climatic change in lake sediments from lake Alchichica, Oriental, Mexico", *Geofísica Internacional* 42(3), pp. 529-537.
- Conde C., O. Sánchez, V. Magaña y C. Gay García (1995), "Escenarios climáticos básicos y regionales", *Memorias del Segundo Taller de "Estudio de País: México"*. México ante el Cambio Climático, Cuernavaca, Morelos, 8-11 de mayo, México, pp. 101-117.
- Conde, C. (2003), *Cambio y variabilidad climáticos: dos estudios de caso en México*, tesis Doctorado (en Ciencias de la Tierra), Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México.
- Conde, C. and H. Eakin. (2003), "Adaptation to climatic variability and change in Tlaxcala, Mexico", Chapter in Smith, J., R. Klein and S. Huq (eds.), *Climate change, adaptive capacity and development*, Imperial College Press, London.
- Ferrer, R., C. Conde, G. Villarreal y D. Liverman (1995), "Agricultura en México y cambio climático global", *Memorias del Segundo Taller de "Estudio de País: México"*. México ante el Cambio Climático, Cuernavaca, Morelos, 8-11 de mayo, México, pp. 185-196.
- Gay G., C., C. Conde, F. Estrada y H. Eakin (2003), "Impactos de la variabilidad climática y de las condiciones económicas en la producción de café en la región centro de Veracruz", *GEOS. Boletín Informativo*, vol. 23, Reunión anual 2003, Puerto Vallarta, Jalisco, noviembre, p. 76.
- García, F. y O. R. Masera (2003), "Assessment and measurement issues related to soil carbon sequestration in land-use, land-use change, and forestry (LULUCF) projects under the Kyoto Protocol", *Climatic Change* (ISI, FR: 1.91; aceptado).
- Garduño, R. (1994), *El Veleidoso Clima*, Fondo de Cultura Económica, México.
- Halffter, G. (1992), "Diversidad biológica y cambio global", *Ciencia y Desarrollo*, 18(104), pp. 33-38.
- Hernández, M. A., L. Villers y C. Conde (2003), "Variabilidad climática en la zona centro del estado de Veracruz", *3er. Simposio Internacional sobre Recursos Naturales. Suelo-Bosque-Atmósfera*, Tlaxcala, México, 19 de noviembre.

- Hernández Tejeda, T. (1994), "Emisiones por el cambio de uso del suelo forestal, quema de pastizales y de residuos de cultivos agrícolas", *Memorias del Primer Taller de "Estudio de País: México"*. México ante el Cambio Climático, Cuernavaca, Morelos, 18-22 de abril, México, pp. 19-22.
- Jáuregui, E., L. Godínez y F. Cruz (1992), "Aspects of heat-island development in Guadalajara, Mexico", *Atmospheric Environment* 26 B, pp. 391-396.
- Jáuregui, E. (1995), "Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización: revisión y perspectivas", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 31, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 9-44.
- Jáuregui, E. y E. Romales (1996), "Urban effects on convective precipitation in Mexico City", *Atmospheric Environment*, 30, pp. 3383-3389.
- Jáuregui, E., J. Cervantes y A. Tejeda (1997), "Bioclimatic conditions in Mexico City: an assessment", *International Journal of Biometeorology*, 40, pp. 166-177.
- Jáuregui, E. y E. Luyando (1998), "Long-term association between pan evaporation and the urban heat island in Mexico City", *Atmósfera*, 11, pp. 45-60.
- Jáuregui, E. y A. Tejeda (2001), "A scenario of human thermal comfort in México City for 2CO₂ conditions", *Atmósfera* 14, pp. 125-138.
- Livermann, D. (1992), "Posibles impactos de los cambios climáticos en México", *Memorias Reunión Anual del Programa Universitario de Medio Ambiente*, octubre, UNAM, México.
- Magaña Rueda, V., E. Villanueva y J. Adem (1994), "Escenarios de cambio climático en México de resultados de modelos que suponen un doblamiento en el CO₂ atmosférico (caso de estudio: Hidrología)", *Memorias del Primer Taller de "Estudio de País: México"*. México ante el Cambio Climático, Cuernavaca, Morelos, 18-22 de abril, México, pp. 55-60.
- Magaña Rueda, V. O. (1994), "An strategy to determine regional climate change", *Memorias del Primer Taller de "Estudio de País: México"*. México ante el Cambio Climático, Cuernavaca, Morelos, 18- 22 de abril, México, pp. 45-54.
- Magaña Rueda, V. M. (1995), "Escenarios físicos de cambio climático", *Memorias del Segundo Taller de "Estudio de País: México"*. México ante el Cambio Climático, Cuernavaca, Morelos, 8-11 de mayo, México, pp. 98-100.
- Magaña V. y C. Conde. (2003), *Climate variability and climate change impacts on the freshwater resources for northwestern Mexico, Sonora: a case study climate, water and transboundary allenges in the Americas*, Edited: Diz, H. F. and B. J. Morehouse.
- Manzini, F. and M. Martínez. (1999), "Choosing an energy future. The environmental impact of End-Use technologies", *Energy Policy*, 27 (7), pp. 401-414.
- Martínez, M. (1992), "Air pollutants due to energy supply in Mexico", *Renewable Energy Journal* 2 (6), pp. 641-644.
- Masera, C. O., M. J. Ordoñez and M. R. Dirzo (1992), "Carbon emissions from deforestation in Mexico: current situation and long-term scenarios", *Climate Change Division*, EPA. Washington, D.C., USA.
- Masera, O. R., M. R. Bellon and G. Segura (1997), "Forestry options for sequestering carbon in Mexico: comparative economic analysis of three case studies", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 27 (special issue), pp. S227-S244.
- Mendoza, Y., O. Masera and P. Macías (2003), "Long-term energy scenarios for Mexico: policy options for carbon savings and main barriers", *Energy Policy*, 19, pp. 962-969.
- Meza-Sánchez, M. y J. F. Cervantes-Borja (1981), "Variaciones del impacto pluvial como base para inferir cambios climáticos en el norte de la cuenca de México", *Boletín*, núm. 11, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 93-118.

- Ortiz-Pérez, M. A. (1994), "Repercusiones del ascenso del nivel del mar en el litoral el Golfo de México: un enfoque geográfico de los problemas del cambio global. México ante el Cambio Climático", *Memorias del Primer Taller de Estudio de País: México*, Cuernavaca, Morelos, pp. 191-197.
- Orozco, F. S. (2004), *Introducción de cultivos alternos para aprovechar el potencial climático en el Estado de Tlaxcala ante la variabilidad climática/cambio climático*, tesis Doctorado en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Ortiz-Pérez, M. A. y A. P. Méndez (1995), "Vulnerabilidad del litoral a los efectos por ascenso del nivel del mar en las costas Bajas del Golfo de México. México ante el Cambio Climático", *Memorias del Segundo Taller de Estudio de País: México*, Cuernavaca, Morelos, pp. 209-217.
- Peterson, A. T., M. A. Ortega-Huerta, J. Bartley, V. Sanchez-Cordero, J. Soberón, R. H. Buddemeler and R. B. Stockwell D. (2002), "Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios", *Nature* 416(6881), pp. 626-629.
- Palma, G. B. (2005), *Generación de escenarios de cambio climático para la zona centro del estado de Veracruz*, tesis de Maestría en Geografía, UNAM, México.
- Sathaye, J. et al. (2001), "Carbon mitigation potential and costs of forestry options in Brazil, China, Indonesia, Mexico, The Philippines, and Tanzania", *Mitigation and Adaptation Strategies for Climate Change: Special Issue on Land Use Change and Forestry Carbon Mitigation Potential and Cost Effectiveness of Mitigations Options in Developing Countries*, 6 (3-4), pp. 185-211.
- Sheinbaum, C. y L. Rodríguez Viqueira (1994), "Metodología "bottom up" para el análisis de las emisiones de gases invernadero debidas al uso de la energía", *Memorias del Primer Taller de "Estudio de País: México"*. México ante el Cambio Climático, Cuernavaca, Morelos, 18-22 de abril, México, pp. 93-98.
- Sheinbaum, C., O. R. Masera, and L. Rodríguez (1997), "Carbon dioxide emissions and mitigation options for Mexico in year 2010", *Conference Proceedings "International Energy Markets, Competition and Policy"*, United States Association for Energy Economics-International Association for Energy Economics, San Francisco, California.
- Sheinbaum, C. and L. Ozawa (1998), "Energy use and CO₂ emissions for Mexico's cement industry", *Energy* 23 (9), pp. 725-732.
- Sheinbaum, C., J. Jáuregui and L. Rodríguez (1998), "Carbon dioxide emission reduction scenarios in Mexico for year 2005", *Industrial Cogeneration and Efficient Lighting, Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2 (1), pp. 359-372.
- Tejeda-Martínez, A. y D. Rivas-Camargo (2003), "El bioclima humano en ciudades del sur de México: un escenario bajo duplicación de CO₂ atmosférico", Rodríguez-Viqueira, M. (comp.), *Estudios de Arquitectura Bioclimática* (anuario 2003, vol. V), UAM-Iztapalapa y Limusa Noriega Editores, México, pp. 182-194.
- Tejeda-Martínez, A. and R. García-Cueto (2002), "A comparative simple method for human bioclimatic conditions applied to seasonally hot/warm cities of Mexico", *Atmósfera*, 15, pp. 55-66.
- UNAM (2001), *Potencial de la Investigación Científica y Tecnológica en Materia de Cambio Climático en México*, Secretaría de Investigación y Desarrollo, Instituto de Ingeniería y Centro de Ciencias de la Atmósfera. Ciudad de México, manuscrito inédito.
- Villers-Ruiz, L. and I. Trejo-Vázquez (1998), "Impact of climatic change in forests and Natural Protected Areas of Mexico", *Interiencia* 23 (1), p. 10.