

UNIVERSIDAD PARA TODOS

Curso

Cambio Climático

Parte 1

PRECIO: 1.00



9 789592 701298

ÍNDICE

Parte 1

CLIMA VARIACIONES Y CAMBIOS / 2

FACTORES ASTRONÓMICOS Y CAMBIOS CLIMÁTICOS / 3

REGISTROS PALEOCLIMÁTICOS / 3

VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA / 4

PRINCIPALES IMPACTOS DE LA VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA / 6

ADAPTACIÓN A LA VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA / 7

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DERIVADAS DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS, Y SU IMPORTANCIA PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO / 8

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y CAMBIO CLIMÁTICO / 8

EFFECTO INVERNADERO / 9

CONCENTRACIONES DE GASES DE INVERNADERO EN LA ATMÓSFERA / 10

EMISIONES Y REMOCIONES DE GASES DE INVERNADERO / 11

EMISIONES GLOBALES DE GASES DE INVERNADERO / 11

CAMBIO CLIMÁTICO. IMPACTOS, VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN / 12

COORDINADOR PRINCIPAL

Dr. Luis Raúl Paz Castro (Instituto de Meteorología, INSMET)

COORDINADORES

Dr. Carlos Manuel López Cabrera (INSMET)

Dr. Ramón Pérez Suárez (INSMET)

COORDINADORA DEL TABLOIDE

Lic. Miriam Ester Limia Martínez (INSMET)

AUTORES DE LA PARTE 1

Dr. Luis Raúl Paz Castro (INSMET)

Dr. Ramón Pérez Suárez (INSMET)

Dr. Carlos Manuel López Cabrera (INSMET)

Dr. Braulio Lapinel Pedroso (INSMET)

Lic. Abel Centella Artola (INSMET)

Dr. Jesús M. Pajón Morejón, Instituto Cubano de Antropología

Dra. Maira Celeiro Chaple, Instituto de Geografía Tropical

Dr. Fernando Ortega Sastriques, Sede Universitaria, Municipio Bauta

Dr. Adolfo L. Méndez Berhondo, Instituto de Geofísica y Astronomía

MSc. Marcelino Hernández González, Instituto de Oceanología

GRUPO DE EDICIÓN EDITORIAL ACADEMIA



Edición: Lic. Raquel Carreiro García

Lic. Hermes Moreno Rodríguez

Diseño y tratamiento de imágenes: Marlene Sardiña Prado

Corrección editorial: Caridad Ferrales Avín

ISBN: 978-959-270-129-8

2008, «Año 50 de la Revolución»

CLIMA VARIACIONES Y CAMBIOS

Clima y tiempo atmosférico. Dos conceptos básicos

Cuando se conversa sobre las condiciones atmosféricas predominantes en un día determinado, las personas suelen utilizar los términos de *tiempo atmosférico* y *clima* indistintamente. Es común que no conozcan que entre ambos términos existen grandes diferencias, a pesar de que, en sentido general, están muy relacionados.

El *tiempo atmosférico* está vinculado con las condiciones de la atmósfera en un lugar determinado para un período de tiempo relativamente corto, que es normalmente de días o semanas. Los chubascos que limitan la movilidad de las personas en las tardes de verano; las bajas temperaturas que acompañan al paso de los frentes fríos; o los fuertes vientos e inundaciones que acompañan a los ciclones tropicales, están todos asociados con este término.

La alta variabilidad del tiempo atmosférico no es algo desconocido por la experiencia de los habitantes de un lugar. Es muy normal que en la mañana de cualquier día haya un intenso calor y un fuerte sol, mientras en la tarde la situación cambie bruscamente, en cuestión de minutos, nublándose el cielo para más tarde llover con gran intensidad.

Por su parte el *clima*, se puede definir como el tiempo atmosférico promedio en una región, para un período relativamente largo de tiempo; por lo general meses, años y más.

Esta definición anterior, si bien es práctica, resulta demasiado simplificada para poder comprender exactamente el significado del *clima*, así es posible describir ese término de una forma más precisa.

Etimológicamente la palabra clima es inclinación y se refiere a la oblicuidad con que los rayos solares llegan a la superficie terrestre, la cual varía según las horas del día, la época del año y la latitud del lugar. Sin embargo, su significado efectivo es más complejo. Según el Vocabulario Meteorológico Internacional, *clima es el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evolución del tiempo en una porción determinada del espacio*.

Las condiciones atmosféricas, que son el conjunto de valores de los elementos meteorológicos en determinado lugar y tiempo (los cuales varían de un día a otro y de una hora a otra), a los efectos del concepto de clima están referidas a aquellas que con más frecuencia se presentan en el lugar; esto lleva a considerar el comportamiento estadístico de cada variable, a la sucesión de valores que se repiten cada año, cada día, cada mes, idénticamente; característica a la cual se le ha dado en llamar régimen normal, para distinguirlo del régimen real de las mismas variables meteorológicas que cambia de un día a otro, de un año a otro.

Existen tres ideas principales en este concepto: el clima está compuesto de fluctuaciones, es una expresión del comportamiento de la atmósfera y hace referencia a una zona o porción determinada del espacio.

Es decir, que cuando se habla del clima de un lugar, se hace referencia a un conjunto de condiciones meteorológicas en determinado lugar y tiempo.

Por supuesto, las características del clima no son iguales en las diferentes zonas del planeta. Estas características están determinadas por una combinación compleja de influencias astronómicas, meteorológicas y geográficas, conocidas como factores climáticos. Estos factores actúan sobre todos los componentes del clima de forma desigual y establecen el comportamiento de cada uno de ellos.

Sistema climático

El clima de la Tierra no está asociado exclusivamente con lo que sucede en la atmósfera, ya que los procesos atmosféricos están relacionados con la superficie terrestre, los océanos, la criosfera (hielo marino, cubierta de nieve estacional, glaciares de montaña y capas de hielo a escala continental) y la biosfera (flora y fauna terrestre y marina). Estos cinco componentes: atmósfera, tierra, océano, criosfera y biosfera, integran el *sistema climático*.

Debido a su gran masa y calor específico, los océanos constituyen un enorme reservorio para almacenar energía. La energía absorbida por el océano produce un cambio relativamente pequeño de la temperatura superficial en comparación con el que se produce sobre la superficie terrestre. Debido a su inercia térmica, el océano actúa como amortiguador y regulador de la temperatura.

Las corrientes oceánicas transportan parte del calor almacenado en los océanos, desde la región intertropical, donde hay exceso de calor por mayor intensidad de la radiación solar incidente, hacia latitudes más frías y regiones polares. La atmósfera y los océanos están fuertemente acoplados. Una vía de acople es la evaporación que suministra el vapor de agua y parte de la energía para el ciclo hidrológico dirigido a la condensación, la precipitación y el escurrimiento.

Principalmente, la importancia de la *criosfera* para el sistema climático se debe a su alta reflectividad de la radiación solar incidente (albedo) y su baja conductividad térmica, con lo cual el hielo y la nieve actúan en latitudes altas como aislantes para la tierra y el agua subyacentes, impidiendo la pérdida de calor. La grandes capas de hielo continental no varían con tanta rapidez como para influir en el clima en la escala estacional o interanual; su papel más importante lo juegan en los cambios climáticos en escalas de tiempo de decenas de miles de años como los períodos glaciales e interglaciares.

Una fuerte interacción con la atmósfera tiene la *superficie terrestre*. El aire en su movimiento en la capa cercana a la superficie terrestre pierde energía por fricción. Ocurre una transferencia de masa principalmente a través de la evaporación del agua sobre la superficie terrestre, la lluvia y la nieve, y en menor medida en forma de otras partículas. Los volcanes lanzan a la atmósfera materia y energía, con lo que incrementa la turbidez del aire. Las partículas adicionales y los gases de sulfuros forman aerosoles que tienen efecto en el balance de radiación de la atmósfera y por consiguiente sobre el clima de la Tierra.

La *biosfera* altera la rugosidad de la superficie terrestre, el albedo superficial, la evaporación, el escurrimiento y la capacidad del suelo de almacenar agua. También influye en el balance del dióxido de carbono en la atmósfera y los océanos por medio de la fotosíntesis y la respiración. La biosfera es sensible a cambios en el clima y existen señales de ello en los fósiles, anillos de los árboles y el polen, lo que sirve para el estudio de los cambios climáticos ocurridos en el pasado.

Como parte de los elementos abióticos del medio ambiente, el clima constituye sin duda, uno de los recursos naturales más apreciados, ya que a diferencia de otros que después de ser utilizados no es posible renovarlos, el *recurso climático* posee la propiedad de restablecer constantemente sus componentes principales, como son el calor y la humedad con sus diferentes combinaciones, la radiación solar, el viento y otros. Además, el clima es el recurso natural básico del que dependen todos los demás.

Variaciones y cambios del clima

El clima es dinámico y presenta una variabilidad intrínseca. El término *variabilidad* se utiliza para indicar desviaciones de las estadísticas climatológicas en períodos de meses, estaciones o años, con respecto a estadísticas de largo plazo referidas al mismo período (mes, estación o año) y se mide por esas desviaciones conocidas como *anomalías*.

Cuando se observan diferencias entre las estadísticas de largo plazo de los elementos del clima calculados para diferentes períodos pero relativo a la misma área, se dice que estamos en presencia de un *cambio climático*. Como el clima es el resultado de las complejas interacciones de muchos componentes, su comportamiento resulta muy dinámico y no lineal. Esto está muy lejos de la visión o percepción errónea de que el clima puede ser definido solamente por los valores medios de las diferentes variables que caracterizan el estado de la atmósfera.

En las últimas décadas se ha ido centrando la mayor atención internacional sobre el tema de la variabilidad climática, en la misma medida en que se han producido anomalías climáticas extremas en diferentes regiones del planeta, que incluyen intensos y extensos procesos de sequía, graves y devastadores eventos lluviosos, años extraordinariamente cálidos y muchos otros fenómenos que han acarreado grandes afectaciones humanas y materiales en no pocos países, alcanzando en algunos casos la calificación de desastres de inmensas proporciones.

FACTORES ASTRONÓMICOS Y CAMBIOS CLIMÁTICOS

Cuando se habla de los factores astronómicos que inciden en los cambios climáticos de carácter global en la Tierra, se está haciendo referencia a dos tipos de fenomenología diferente. Una está relacionada con la actividad solar y la otra con las variaciones cíclicas en el movimiento terrestre. Esta última es conocida como ciclos o teoría de Milankovitch en honor al ingeniero civil y geofísico servio Milutin Milankovitch (1879-1958).

Ciclos de Milankovitch

La teoría de Milankovitch se resume en un efecto combinado que una serie de variaciones cíclicas del movimiento de la Tierra producen sobre el clima terrestre al influir en la cantidad de energía solar que nos llega. A saber: variaciones en la inclinación del eje de rotación, la precesión y la variación en la forma de la órbita (excentricidad) de la Tierra:

- Forma de la órbita (excentricidad) de la Tierra. La órbita terrestre es una elipse y la excentricidad de una elipse es la medida de cuán alejada o cercana están una elipse y un círculo. La excentricidad de la órbita terrestre varía entre 0,005 (órbita casi circular) y 0,0658 (medianamente elíptica) con un valor medio de 0,028. Las variaciones de la excentricidad de la órbita terrestre ocurren con un período característico de unos 100 años.
- Inclinación del eje de rotación de la Tierra. El ángulo de inclinación del eje de rotación de la Tierra describe una variación cíclica de 2,4° respecto al plano de la órbita terrestre, tomando aproximadamente 41 000 años en variar entre 22,1° y 24,5°. En la actualidad el ángulo de inclinación del eje de rotación de la Tierra es de 23,44° y está en decrecimiento.
- Movimiento de precesión. El movimiento de precesión es la variación en la dirección del eje de rotación de la Tierra relativa a las estrellas fijas (por ejemplo, a la estrella Polar). Este movimiento giroscópico, que es debido a que nuestro planeta no es exactamente una esfera, describe una circunferencia en alrededor de 26 000 años y ocasiona que la temperatura en las latitudes altas (polos) se torne más o menos alta siguiendo esta periodicidad.

Milankovitch hizo notar que tales variaciones cíclicas provocaban una diferenciación periódica en la cantidad de energía o radiación solar que recibía el planeta. Cuando la órbita de la Tierra es más alargada (mayor excentricidad) la cantidad de radiación solar que se recibe en el perihelio (punto orbital más cercano al Sol) es aproximadamente 23 % mayor que la que se recibe en el afelio (punto orbital más lejano al Sol). Si la órbita fuese circular no existiría diferencia alguna.

Por otra parte, cuando el eje de rotación de la Tierra se inclina más (llega a los 24,5°) provoca veranos más cálidos e inviernos más fríos en ambos hemisferios del planeta. Estos ciclos de Milankovitch constituyen la teoría astronómica de las oscilaciones del clima en la Tierra y posibilitó el cálculo de los tiempos de los grandes períodos glaciales del pasado con una alta precisión.

Actividad solar

La atmósfera del Sol se extiende más allá de la órbita de Plutón, de manera que la Tierra se encuentra inmersa en la más externa de las capas de la atmósfera solar, a merced de su continua expansión y evolución. Este hecho, además de algunas evidencias, ha motivado desde hace muchos años a que no pocos especialistas se cuestionen hasta cuánto pudiera influir la actividad solar en los cambios climáticos. Expongamos aquí, resumidamente, algunos hechos importantes que pudieran estar indicándonos algo:

- Ciclos de actividad solar: La presencia de manchas observadas en la fotosfera solar es un signo inequívoco y paradigmático de lo que se llama actividad solar. Como es conocido, el número de manchas tiene una rigurosa ciclicidad, con un período promedio de 10 a 12 años. Este es un hecho que se viene comprobando con un conteo sistemático diario de las manchas solares desde mediados del siglo XVIII. No pocos estudios muestran la existencia de una muy buena correlación entre estos ciclos de actividad solar y la presencia en la Tierra de cambios climáticos bruscos y períodos significativamente prolongados con valores anómalos de temperatura. Por ejemplo, se habla de la existencia de una «pequeña era glacial» donde el clima fue de particular rudeza en la mayor parte del planeta, con temperaturas muy frías. Esta «pequeña era glacial» se extendió entre mediados del siglo XVI y finales del siglo XIX, que coincidió con un período donde prácticamente no se observaron manchas en el Sol, conocido como mínimo de Maunder.
- Constante solar que no es constante. La llamada constante solar es la cantidad de energía solar que nos llega en forma de radiación por unidad de tiempo y unidad de superficie. Se mide en un plano perpendicular a los rayos solares incidentes en la parte externa de la atmósfera terrestre. Los resultados de su medición por satélites indican un valor promedio de 1366 W/m². Ya se ha demostrado que este valor, asumido constante, no es tal. Mediciones rigurosas desde satélites han mostrado una variación periódica de aproximadamente 1 W alrededor de su valor promedio. Esta variación tiene un ciclo que correlaciona muy bien con el ciclo de manchas solares.
- Rayos cósmicos. Un factor astronómico importante a tener en cuenta es el bombardeo continuo de rayos cósmicos a que está sometido el planeta. Los rayos cósmicos son partículas subatómicas de muy alta energía que se originan en las explosiones de supernovas muy lejos del Sistema Solar. Estudios han mostrado una correlación muy alta entre la llegada de rayos cósmicos y la formación de nubes en la atmósfera terrestre, así como entre los rayos cósmicos y la temperatura global del planeta: a mayor llegada de rayos cósmicos, menor temperatura.

Existe también una relación comprobada y establecida entre la actividad solar y la llegada de rayos cósmicos a la Tierra. Resulta que a mayor actividad solar, menos rayos cósmicos llegan a la Tierra. De manera que en este sentido, también la actividad solar estuviera modulando, a través de la cantidad de rayos cósmicos que llegan a la Tierra, variaciones en los patrones climáticos en el planeta.

REGISTROS PALEOCLIMÁTICOS

Etimológicamente la palabra «paleoclima» significa «clima antiguo», por tanto la «paleoclimatología» es la ciencia que estudia los climas pasados a partir de las huellas que estos han dejado en los registros fósiles, formaciones geológicas y suelos. Desde la formación de nuestro planeta, el clima de la Tierra ha evolucionado de manera constante junto al desarrollo de la corteza terrestre y la evolución de la vida, sobre todo la vegetal. Si se toma como patrón de escala temporal la duración de la vida humana o inclusive la propia existencia de la civilización se puede considerar el clima del planeta como bastante estable.

Uno de los factores que más influyen en las características del clima es la composición de la atmósfera terrestre. La atmósfera que conoce la humanidad no es la que siempre ha existido. La actividad humana está modificando la composición de la atmósfera lo que ya repercute, sin duda alguna, en las características climáticas del planeta. No obstante, discernir el carácter e intensidad de los cambios provocados por la actividad humana de aquellos provocados por causas naturales es uno de los mayores retos que enfrentan los climatólogos.

En la comprensión de los cambios climáticos acaecidos a lo largo de la historia geológica del planeta reside la llave para resolver esta interrogante, de ahí que resulte imprescindible el estudio de los datos paleoclimáticos que registran la variabilidad pre-sociedad. Paleoclimatólogos y paleoambientalistas, así como especialistas de las ciencias de la tierra y las biociencias pueden leer los archivos naturales. Los datos extraídos de estos permiten obtener información sobre las condiciones climáticas y ambientales del pasado.

Por ejemplo, a partir del estudio de la amplitud y densidad de los anillos arbóreos es posible estudiar los cambios producidos en la temperatura y las precipitaciones en los últimos 10 000 años (período Holoceno). Los corales, por su parte, pueden también suministrar información parecida a los anillos de los árboles, en este caso cada capa de un depósito coralino representa un año de crecimiento.

Los testigos de hielo proporcionan importantes estimaciones sobre el clima del pasado, el contenido de los isótopos de oxígeno e hidrógeno en las capas de hielo polar proporcionan registros sobre los cambios en la composición atmosférica en los últimos 160 000 años. El análisis del polen fósil presente en los depósitos turbosos y suelos de los lagos naturales, permite obtener información sobre las condiciones ambientales en el pasado. Las bandas de crecimientos presentes en las formaciones estalagmíticas de las cavernas, también brindan información sobre el clima y ambiente pasado.

El área del Caribe es rica en estos tipos de registros naturales e históricos. Particularmente Cuba, es un ejemplo o polígono natural de estudio de estos archivos del clima y el ambiente en el pasado.

La inestabilidad del clima de la Tierra durante todos los períodos geológicos y escalas de tiempo es un hecho contundentemente demostrado por la comunidad científica internacional. Ello no significa que, en determinadas áreas de la tierra, zonas climáticas, períodos y escalas de tiempo, hayan tenido lugar etapas de relativa estabilidad climática.

VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA

La humanidad ha tenido que enfrentarse tradicionalmente a las variaciones del clima. El desarrollo secuencial de las estaciones del año impone el ritmo de la vida en la tierra. En la mayor parte del mundo, el clima oscila como un péndulo entre el verano y el invierno. Inclusive en los trópicos, donde el tiempo es cálido durante todo el año, períodos de lluvia se alternan con estaciones poco lluviosas, e incluso secas, en las que cada una mantiene su propio patrón de vientos predominantes. La evolución del clima entre las estaciones del año es definida por los climatólogos como *variabilidad estacional* (Fig. 1).

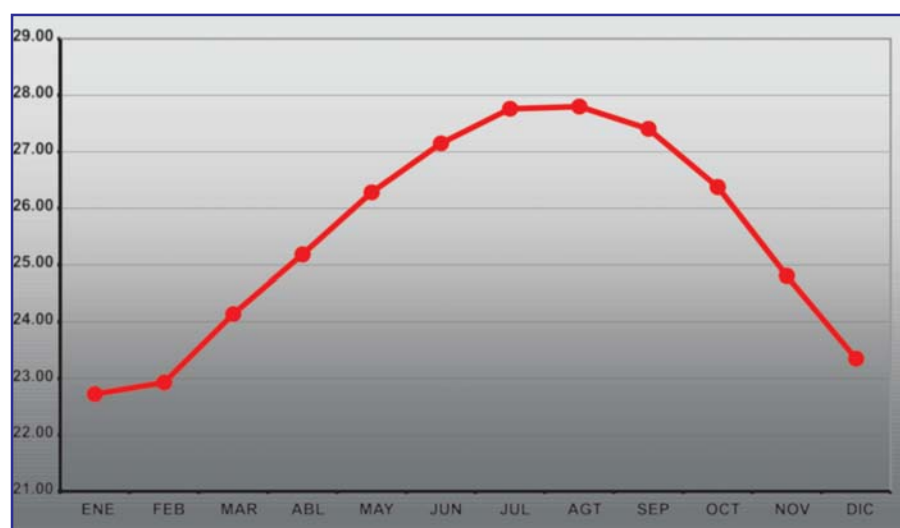


Fig. 1. Temperatura media mensual (período 1961-1990) de Cuba como ejemplo de la variabilidad estacional del clima.

Para subsistir y desarrollarse, la raza humana ha aprendido a adaptarse a los cambios de las estaciones. Año tras año, el ser humano ha sembrado y cosechado cultivos, criado ganado, desplegado barcos de pesca y planeado expediciones de caza según fechas bien definidas en el calendario.

Siglos de tradición han influido sobre la forma en que se programan eventos y actividades como proyectos de construcción, vacaciones escolares, planes turísticos y comerciales, entre otros. Las variaciones estacionales afectan las necesidades de vestirse y las disponibilidades de comida y agua traen como respuesta variaciones de la dieta, el vestir y el desarrollo de sistemas de construcciones y almacenamiento de alimentos.

Variabilidad interanual

Pero las estaciones del año a veces marchan a un ritmo diferente, y alteran los patrones normales de vida de incontables especies de plantas, animales y cientos de millones de seres humanos. Desde tiempos re-

motos, el potencial de experimentar años de abundancia alternados con años de hambre ha sido una de las mayores preocupaciones de las sociedades a lo largo de la historia de la humanidad. Las diferencias en el comportamiento del clima entre un año y otro se conocen como *variabilidad interanual del clima* (Fig. 2).

La ocurrencia de intensos y extensos procesos de sequía, graves y devastadores eventos lluviosos, intensos huracanes, años extraordinariamente cálidos y muchos otros fenómenos, han acarreado grandes afectaciones humanas y materiales en no pocos países que han alcanzado en algunos casos la magnitud de desastres de inmensas proporciones.

Nadie pone en duda la importancia y actualidad de los estudios del impacto de los desastres naturales vinculados a los elementos de la variabilidad climática a diferentes escalas espacio-temporales. No obstante, esto no deja de ser un análisis parcial de una cuestión mucho más general.

La variabilidad interanual del clima es capaz de establecer extremos en los diferentes elementos que, sin llegar a constituir desastres del orden de las grandes sequías o inundaciones severas, pueden definir impactos nada despreciables sobre las actividades socioeconómicas. En este sentido, es importante señalar que, si bien desde el punto de vista de una variable aislada, un extremo pudiera considerarse

un evento poco frecuente, cuando se consideran conjuntamente todos los elementos constituyentes del clima, ellos pasan a tener un peso importante y su presencia puede encontrarse, al menos una vez en cada periodo estacional.

Como ejemplo de lo anterior puede considerarse el caso de las tormentas invernales que afectan a Cuba. Su influencia debe enfocarse no sólo en el daño provocado por el tiempo severo que en ocasiones acompaña a estos sistemas, sino también en la existencia de una marcada variabilidad interanual. Años muy activos son seguidos por otros de muy bajo nivel de actividad.

Usualmente, una elevada actividad de estos sistemas meteorológicos incrementa las lluvias invernales en Cuba, principalmente en el primer trimestre del año. Este período es coincidente con la cosecha de los principales cultivos de esta época. Bajo este exceso de humedad se generan condiciones desfavorables para muchos cultivos, lo que puede conducir a serios daños económicos.

Uno de los eventos meteorológicos más nocivos en el planeta es la *sequía*. El Vocabulario Meteorológico Internacional en su acepción más común la define como: «Un período de condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitaciones cause un grave desequilibrio hidrológico». Es muy conocido que la sequía como fenómeno de desarrollo gradual, comienza y termina de maneras no bien definidas y su impacto es sumamente variado.

De hecho, existen tantas definiciones de sequía, como objetivos hay para definirlos. Sin embargo, un denominador común es la «escasez de precipitación» con respecto a un comporta-

miento «normal» de esta y, como valor «normal de precipitación» se considera un valor promedio histórico obtenido a partir de una serie de longitud determinada. Si consideramos este valor «normal» como inalterable en el tiempo, estamos entonces eludiendo la constante modificación del clima, por lo que también es necesario tener en cuenta que la lámina de precipitación de referencia debiera ser dinámica y reflejar al «clima en evolución».

Este fenómeno, si bien constituye una afectación climática que la sociedad ha enfrentado tradicionalmente, en los últimos decenios su acrecentada influencia ha dado lugar a que se le considere como «[...]uno de los mayores desastres naturales del mundo, el más frecuente y persistente, de mayores efectos negativos para la producción agrícola, como también de impactos adversos reales y potenciales sobre el medio ambiente». Tal influencia puede ser considerada como parte de las irregularidades observadas en el comportamiento del clima en las décadas más recientes, ya sea por manifestaciones extremas, dentro de su variabilidad natural, u originadas por el cambio climático.

Los eventos de sequía causan importantes trastornos en la vida social e impactos altamente negativos sobre los ecosistemas naturales y de cultivos, con el consecuente deterioro de los suelos, proceso que combinado con la también frecuente ocurrencia de eventos máximos de lluvias, acelera los procesos de desertificación en zonas frágiles y genera cuantiosas pérdidas económicas.

El fenómeno de la sequía, en su carácter multidireccional, también ejerce un papel determinante en el ciclo hidrológico, en particular sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos, sus reservas y las características del manejo y explotación que obligan a tomar soluciones emergentes en las áreas afectadas, relacionadas con el abasto, riego y generación de energía. Otro aspecto no menos importante es su estrecha vinculación con la salud humana y animal, por cuanto estos eventos repercuten en el desarrollo de enfermedades infecciosas y no infecciosas transmitidas por agua y vectores.

Los procesos conducentes a la sequía son sumamente complejos y sus orígenes más inmediatos pueden estar vinculados a «la escasez de humedad atmosférica, la insuficiencia de sistemas generadores de lluvia o la persistencia de una fuerte subsidencia, o bien la combinación de algunos de estos factores».

La sequía es un evento climático extremo, expresión de la variabilidad del clima. Esta última también se expresa en una escala multianual. De tal forma, épocas cálidas se suceden a épocas frías, así como épocas de sequía se suceden a épocas lluviosas.

Las complejas interacciones entre los diferentes medios que componen el Sistema Climático tienen una profunda influencia en la variabilidad del clima a diferentes escalas temporales. Muchos de los eventos de la variabilidad interanual observados tienen su origen en los efectos de interacción entre los componentes del sistema climático.

Con cambios en la circulación oceánica y atmosférica están relacionadas la mayoría de las anomalías interanuales de los climas regionales. La temperatura superficial del mar posee una significativa influencia sobre la circulación atmosférica. El calentamiento de la troposfera baja y media produce cambios significativos en el campo de presión y, en consecuencia, en la circulación del aire. A su vez, la temperatura del mar también posee sus propias variaciones. Así, puede observarse que mientras la memoria de la atmósfera es ágil y responde a alteraciones en días o semanas, el océano posee una mayor inercia y toma meses en alcanzar un nuevo equilibrio.

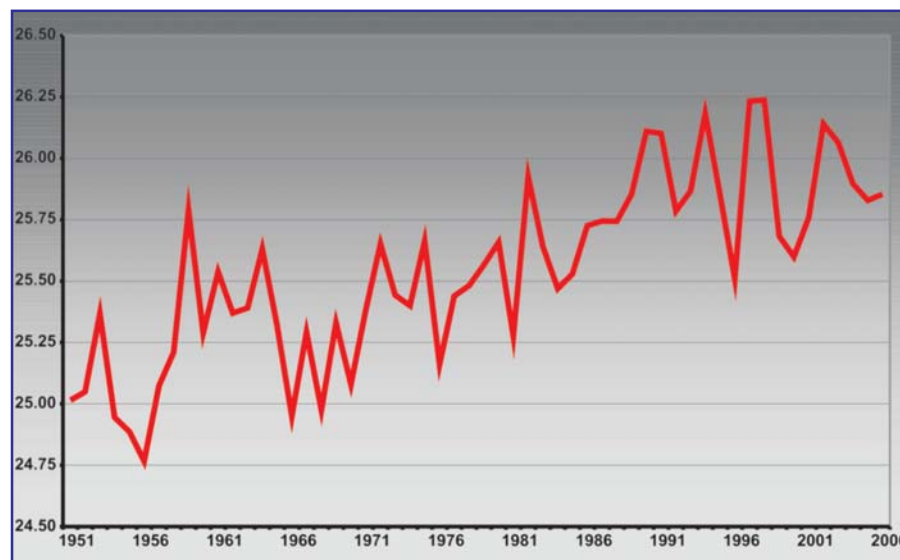
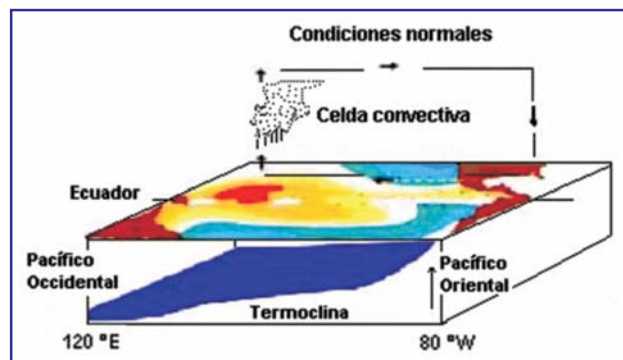


Fig. 2. Temperatura media anual de Cuba entre 1951 y el 2006. Ejemplo de variabilidad interanual del clima. Obsérvese las diferencias entre un año y otro.

Variabilidad interanual del Sistema Océano-Atmósfera. El Niño- Oscilación del Sur (ENOS)

Muchas de las anomalías en los climas regionales a escala mundial, están relacionadas con cambios en la circulación global sobre los trópicos. Este complejo problema fue primeramente reseñado por Hildebrasson en 1897 cuando en su estudio denominado «Los Centros de Acción» definió una variación inversa de la presión entre Australia y el sur de Sudamérica. Este hecho, sería el precedente del descubrimiento en las primeras décadas del siglo xx de la llamada «Oscilación del Sur» por Sir Gilbert Walker.

Durante las primeras décadas del siglo xx, Walker, entonces Director General del Observatorio británico en la India, identificó una circulación atmosférica a lo largo del Ecuador en el Océano Pacífico que ahora es generalmente referida con su nombre. La Circulación de Walker es un cuadro simple del flujo de aire zonal a través del Pacífico que no toma en cuenta las variaciones estacionales ni las de año en año (Fig. 3).



(Fuente: www.cpc.noaa.gov).

Fig. 3. La Circulación de Walker.

Sin embargo, esta descripción captura los aspectos más esenciales de la circulación zonal en el Océano Pacífico Tropical que son:

- Presión atmosférica superficial mayor al este que al oeste.
- Vientos alisios superficiales que soplan de este a oeste acumulando calor y humedad extraídos de la superficie oceánica.
- Convección tropical con lluvias intensas que ocurre sobre el Pacífico Occidental en la zona donde los alisios convergen.
- En los niveles altos de la atmósfera un flujo de vientos del oeste brinda un adecuado flujo de retorno.
- Al este del océano se experimenta aire subsidente que define un clima relativamente árido sobre la región.

Este patrón posee una significativa variabilidad de año en año determinada por sucesivos fortalecimientos y debilitamientos de los gradientes de presión en el área, denominados como la Oscilación del Sur, a la que Walker describió de la siguiente forma: «En general, cuando la presión es alta en el Océano Pacífico, ella tiende a bajar en el Océano Índico desde África hasta Australia, estas condiciones están asociadas con bajas temperaturas en ambas áreas y la lluvia varía en la dirección opuesta a la presión».

Cuando la presión es más baja que lo normal sobre Asia y Australia, tiende a ser más alta que lo normal sobre el Pacífico Central y Oriental, lo que provoca una intensificación de la Circulación de Walker. Entonces se dice que la Oscilación del Sur (OS) está en su fase positiva. Similarmente, en años en que la presión superficial es más alta que lo normal sobre Asia y Australia, es más baja en el Pacífico Central y Oriental lo que provoca un debilitamiento de la Circulación de Walker. Entonces se estará en la fase negativa de la OS. La OS es el elemento más importante de la variabilidad interanual del clima en los trópicos.

Estudios realizados entre las décadas de los años 70 y 80 confirmaron que la OS posee una naturaleza cíclica marcadamente aperiódica, con preferencia a oscilar entre una escala de 3 a 6 años, pero con variaciones que pueden llegar hasta los 10 años. Sin embargo, unos de los descubrimientos más importantes en esta época, fue el reconocimiento de que la OS posea manifestaciones en diferentes regiones del globo, incluyendo una clara relación con eventos meteorológicos en latitudes extratropicales.

Aunque las causas de la OS no son aún bien entendidas, sus consecuencias climáticas son más obvias, lo que llevó en el decenio de 1980 a la confección de mapas que ilustran las regiones donde las anomalías de lluvia son particularmente sensibles a la alteración de la OS.

En 1966 se daba un paso de avance importante en la comprensión de la variabilidad del clima tropical, cuando el científico noruego Bjerknes desarrolló un modelo conceptual que relacionaba la OS con anomalías de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Ecuatorial, lo que dio un serio impulso a los estudios del fenómeno llamado «El Niño».

En el litoral del Pacífico desde Ecuador, a través de Perú, hasta el norte de Chile, se encuentra uno de los desiertos costeros más extensos de la tierra. La vegetación natural y la agricultura están prácticamente restringidas al lecho de los ríos provenientes de los Andes. El alimento en esta región se obtiene de los recursos marinos, ya que las aguas emergentes de la corriente fría, llamada Corriente de Humbolt, que baña las costas de esta región son ricas en nutrientes y permiten la existencia de una importante población de especies marinas.

Sin embargo, en determinados años este delicado equilibrio ecológico se ve severamente perturbado. Mientras que con el ciclo anual, la temperatura superficial del mar tiende a ser máxima entre marzo y abril, en ciertos años un calentamiento anómalo comienza desde diciembre, cerca de la Navidad por lo que su existencia fue conocida como «El Niño» en referencia al Niño Jesucristo.

Recientemente el nombre de El Niño se utilizó para describir el evento de calentamiento a gran escala que ocurre a lo largo de toda la costa de Sudamérica como una manifestación de cambios en las capas oceánicas superiores, vinculados a procesos que se extienden sobre todo el Pacífico Ecuatorial (Fig. 4).

El calentamiento anómalo de la superficie del mar durante un evento El Niño provoca cambios en el contenido de nutrientes del océano, lo cual causa la muerte masiva de peces y otras especies marinas. Adicional-

mente, las corrientes cálidas traen un calentamiento adicional de la atmósfera con incremento de la humedad y por consiguiente la aparición de lluvias anómalas. Aunque en las zonas desérticas, propias de esta región, faltan las precipitaciones por años, lluvias de esta magnitud e intensidad, no constituyen de modo alguno, una bendición sino una componente adicional de desastres, que causa erosión y pérdida de la superficie laborable, destrucción de carreteras, líneas de comunicaciones y casas.

Existe una estrecha relación en el comportamiento del océano y la atmósfera a través del Océano Pacífico Ecuatorial, particularmente una fuerte coherencia entre el evento El Niño y la fase baja de la OS. Este hecho ha llevado al uso de un término general para describir ese evento acoplado como El Niño-Oscilación del Sur o ENOS, en la que El Niño es la componente oceánica y la Oscilación del Sur la atmosférica. De esta forma la fase cálida del ENOS coincide con El Niño (o el calentamiento oceánico) y la fase negativa de la OS. Igualmente la fase fría del ENOS coincide con La Niña (o el enfriamiento oceánico) y la fase positiva de la OS.

Las características básicas de las circulaciones atmosféricas y oceánicas a lo largo de todo el Pacífico Ecuatorial se obtienen como resultado de la acción mutua entre los vientos alisios, forzando mecánicamente la superficie oceánica y esta última transfiriendo calor y humedad a la atmósfera. Esta interacción mutua actúa sobre la intensidad y mantenimiento de la Circulación de Walker.

El forzamiento mecánico de los vientos alisios actúa para mantener el gradiente de temperatura superficial del mar a través del Pacífico, particularmente mediante el proceso de afloramiento de agua fría hacia el este. Las altas presiones atmosféricas al este del océano se ven también favorecidas por la existencia de aguas más frías sobre esta zona. El gradiente de presión entre el este y el oeste del Pacífico es el mecanismo que mantiene la intensidad de los vientos alisios.

En su paso a través del Pacífico, los vientos alisios acumulan suficiente calor y humedad para mantener los procesos convectivos hacia el oeste de la cuenca, sobre la región donde se ubican las aguas más cálidas.

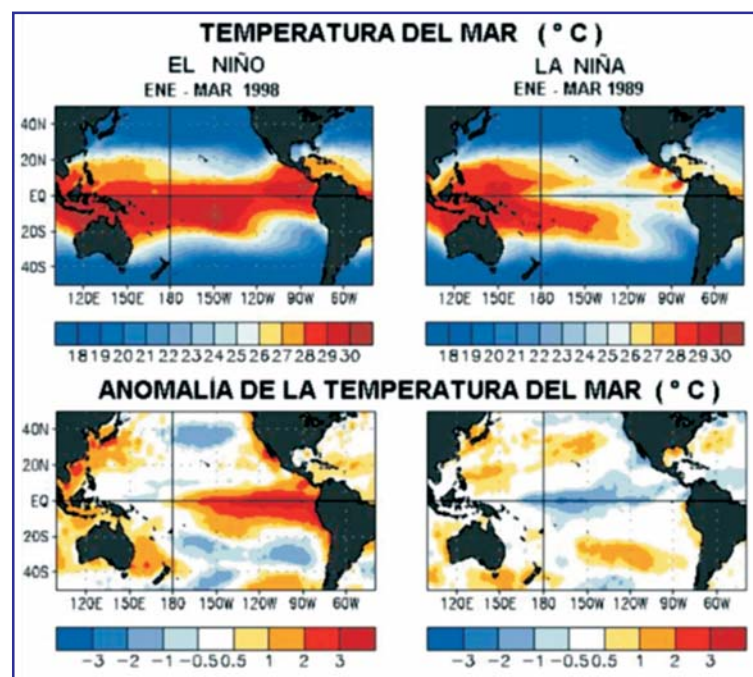
Durante un evento El Niño, sin embargo, las aguas cálidas superficiales se expanden hacia el este en dirección a Sudamérica, por lo que se produce un calentamiento anómalo sobre las aguas del océano Pacífico Central y Oriental. Como resultado, el calentamiento del mar debilita, a su vez, el gradiente de presión atmosférica sobre la cuenca lo que provoca una disminución en la intensidad de los vientos alisios.

Adicionalmente, la existencia de aguas más cálidas en el Pacífico Central y Oriental resulta ser también una fuente de calor y humedad que, en ausencia de los vientos alisios fuertes, provoca áreas de convección profunda y precipitaciones mucho más al este de lo normal.

El evento El Niño está también muy vinculado al ciclo anual. Como regla general, el calentamiento anómalo de la superficie del océano se detecta primeramente sobre mediados del año y el máximo de las anomalías de temperatura se alcanza hacia finales del año. Como regla general, hacia mayo del siguiente año ya las anomalías significativas han desaparecido en todo el océano.

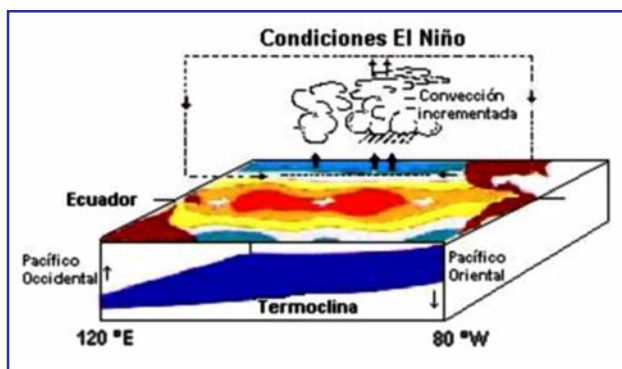
Durante un evento El Niño fuerte, la Circulación de Walker puede invertirse sobre el Pacífico Occidental y Central causando el predominio de aire seco y subsidente, sobre partes de Asia y Australia y provocar severas condiciones de sequía en muchas de estas regiones (Fig. 5).

Sobre el otro lado, en el este del Pacífico la convección anómala provoca lluvias, con fuertes inundaciones en zonas costeras de Ecuador y Perú.



(Fuente: www.cpc.noaa.gov).

Fig. 4. Temperatura y anomalía de la temperatura superficial del mar (enero-marzo) durante los eventos El Niño 1997-1998 y La Niña 1988-1989.



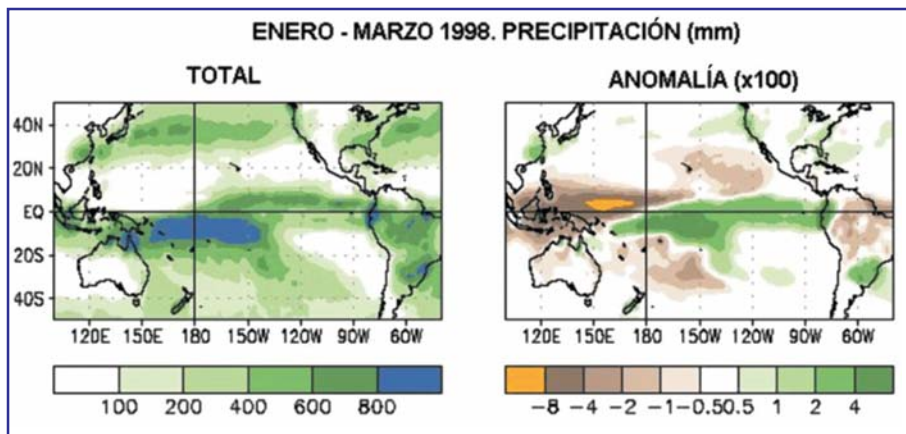
(Fuente: www.cpc.noaa.gov).

Fig. 5. Circulación de Walker durante un evento El Niño.

Adicionalmente al impacto directo que poseen los cambios en la Circulación de Walker, un evento ENOS tiene otros impactos sobre la circulación general de la Atmósfera. Sobre el Pacífico Ecuatorial los patrones de transporte atmosférico cambian. Esto tiene un impacto dramático en las corrientes atmosféricas subtropicales provocando impactos en los patrones estacionales del tiempo atmosférico sobre norte y sur América y otras partes del globo en un proceso denominado como «teleconexiones».

Un evento ENOS generalmente alcanza su fase madura durante el invierno del hemisferio norte cuando el flujo atmosférico del oeste en este hemisferio está también en su máximo, y cuando existen evidencias de que los impactos ya han alcanzado lugares tan alejados como África.

No todos los patrones de anomalías atribuidas al ENOS son consistentes de un evento a otro. Sin embargo, en muchas partes del planeta y para algunas estaciones del año existen patrones de anomalías que se repiten con cada evento (Fig. 6). Estos patrones recurrentes forman la base de los sistemas de avisos y alertas frente a la aparición de un evento ENOS y constituyen elementos clave en los modelos de predicciones climáticas.



(Fuente: www.cpc.noaa.gov).

Fig. 6. Comportamiento de la precipitación durante el trimestre enero-marzo de 1998, asociado al evento El Niño 1997-1998.

Durante las últimas décadas, los estudios concernientes a los impactos de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) han capitalizado la atención de la comunidad científica, por la enorme importancia socioeconómica que poseen a escala global. Un aspecto importante que tienen los ENOS es su capacidad de influir en la estructura de los patrones regionales del clima como es el caso de la actividad de ciclones tropicales en el Atlántico Norte y las Tormentas Invernales del Golfo de México.

El evento ENOS constituye el factor regulador más importante que se conoce de la variabilidad interanual de clima en los trópicos. Sin embargo, otros procesos no menos complejos, constituyen elementos que de algún modo «regulan» esa variabilidad.

En la atmósfera tropical son muy comunes los patrones de variabilidad en la escala cuasibienal dentro de las series de diferentes variables climáticas. El origen de estas variaciones no siempre resulta claro y en ocasiones responde a la combinación de varios facto-

res. No obstante, existe un marcado proceso en la estratosfera tropical baja, cuya escala temporal cae dentro del rango próximo a los dos años, y que ha llamado la atención a la comunidad científica por existir evidencias en cuanto a la influencia que ejerce sobre la variabilidad del clima troposférico. Esta es la llamada «Oscilación Cuasibienal».

Esta oscilación (conocida por sus siglas en inglés QBO) es una oscilación entre el régimen de vientos ecuatoriales del este y del oeste en la estratosfera que ocurre como promedio cada 28 meses, que puede variar entre 22 y 36 meses. Los vientos del este son dominantes y generalmente más intensos que los del oeste. La oscilación máxima ocurre entre los 23 y los 26 kilómetros de altura, sobre el Ecuador y decrece hacia abajo y hacia los polos.

Aunque la amplitud de la QBO decrece rápidamente desde el Ecuador, las observaciones y la teoría muestran el efecto de la QBO en una gran región de la atmósfera. Particularmente, la QBO es relacionada con la variabilidad interanual de los sistemas sinópticos migratorios de la zona tropical y de las propias variables meteorológicas, principalmente de la precipitación.

A pesar de la relación entre estos dos factores no es clara, las evidencias sugieren que la QBO es capaz de ejercer un efecto modulador sobre el impacto del ENOS en algunas variables climáticas. Desde este punto de vista, existen evidencias que las anomalías observadas en el régimen de precipitaciones invernales en Cuba bajo la influencia del ENOS presentan diferencias notables si ocurre en fases diferentes de la QBO.

PRINCIPALES IMPACTOS DE LA VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA

Para entender los impactos de la variabilidad climática es necesario examinar cómo la sociedad está preparada para enfrentar sus efectos. Esto incluye la posibilidad de adoptar medidas anticipadas, las cuales son llamadas comúnmente estrategias de manejo de riesgos.

La forma más dramática a través de la cual la variabilidad climática afecta la sociedad es mediante la ocurrencia de eventos extremos (anomalías climáticas severas). En este sentido, la vulnerabilidad a los diferentes eventos extremos del clima es función de la incidencia (como elemento climático) y de la exposición (como elemento socioeconómico), esta última depende de tres factores fundamentales: población bajo riesgo, propiedades o infraestructuras económicas bajo riesgo, y nivel de preparación.

Los dos primeros puntos presuponen un incremento de la vulnerabilidad potencial debida al crecimiento y distribución geográfica de la población, así como al desarrollo económico que ha venido sosteniendo Cuba, básicamente en el sector agrícola y en el turismo. Por esta razón la posibilidad de que un evento extremo provoque daños en la infraestructura económica se ha multiplicado en los últimos 40 años. Esto le otorga a los niveles de preparación un valor fundamental y estratégico.

No siempre un mismo tipo de fenómeno es capaz de producir iguales impactos en la sociedad. Primero, esto depende de la característica física del fenómeno (intensidad, duración y otros) que gobierna el nivel de exposición al riesgo y segundo, del nivel de preparación, el cual es crucial en términos de disminución o incremento de la vulnerabilidad. Dos ejemplos pretenden ilustrar este importante concepto. Uno vinculado al impacto ENOS sobre Cuba y el otro se relaciona con los huracanes. Ambos elementos forman parte de la

variabilidad natural del clima en Cuba a escalas espacio temporales diferentes.

En nuestro país el interés por El Niño ha sufrido una rápida variación en la última década y ha pasado de ser un elemento misterioso y virtualmente desconocido para los tomadores de decisiones y la población en general, a convertirse en unos de los principales elementos a considerar cuando se habla de temas relacionados al clima.

El Niño 1982-1983

En términos de desastres, los impactos del evento 1982-1983 fueron los más severos experimentados en Cuba desde que se tenga noticias. En el invierno de 1982-1983 se desarrollaron 26 ciclones extratropicales en el Golfo de México, lo cual constituye una cifra récord. Algunos de estos fenómenos se desarrollaron a muy baja latitud, con acumulados de lluvias que sobrepasaron de 3 a 5 veces los acumulados históricos en casi todo el país y provocaron el invierno más húmedo y lluvioso en los últimos 50 años.

Sin embargo, las abundantes lluvias no constituyeron el único factor meteorológico adverso; eventos de insólita intensidad y frecuencia también asolaron el territorio cubano. En marzo de 1983 se registraron vientos del sur con fuerza huracanada, que causaron enormes daños en la región occidental del país. El día 16 de ese propio mes se reportó el mayor brote de tornados hasta ahora conocido en Cuba, con un total de siete.

Quizás el impacto más conocido, asociado a El Niño 1982-1983, fue la intensa penetración del mar que ocurrió el 17 de marzo e inundó extensas áreas urbanas de la Ciudad de La Habana (capital de Cuba con una densidad poblacional superior a los 2 000 hab/km²), y produjeron severos daños en toda la infraestructura de la ciudad.

En el Golfo de México un intenso sistema de bajas presiones extratropicales a muy baja latitud, produjo olas entre 4 y 5 m, las cuales se combinaron con otros factores para provocar la penetración del mar más profunda y devastadora que se recordaba en La Habana desde el gran huracán de 1926. Los daños fueron cuantiosos en todo el país y la prensa oficial los reflejó con cifras sin precedentes hasta ese momento.

Resulta importante destacar que ninguno de esos sucesos fue vinculado en lo absoluto con El Niño. Los impactos del evento 1982-1983 tomaron por sorpresa a todo el país, desde el punto de vista de la vigilancia climática, al no existir un claro conocimiento que permitiera explicar lo que estaba sucediendo. Consecuentemente, los mecanismos de prevención y respuesta actuaron bajo una fuerte presión, y muchas actividades económicas y servicios sociales fueron muy afectados.

El Niño 1997-1998

En la década de los 90, conjuntamente con el desarrollo de las investigaciones científicas en este campo, con la creación de los primeros sistemas de vigilancia climática en el país y con la mayor experiencia internacional acumulada, se incrementó, de manera proporcional, el interés del Estado y la población por el evento El Niño.

Esto se reflejó no solo en el financiamiento otorgado a proyectos de investigación sobre el tema, sino también por el comienzo de una labor más intensa y sistemática de información y orientación a la población en los medios oficiales. A raíz del evento 1994-95 se intensificó de manera importante la cobertura noticiosa al respecto. Por otra parte, la investigación científica y las tareas de vigilancia climática se incrementaron y fortalecieron durante la década de los 90.

Se puede afirmar que en el momento que hace su aparición el ENOS de 1997-1998, el desarrollo científico alcanzado por Cuba, en los estudios relativos a estos eventos, era alto y permitió un trabajo más eficiente de seguimiento y predicción.

El evento ENOS 1997-1998 ha sido catalogado como el más intenso del presente siglo. Sus características de intensidad y duración, así como la magnitud de los impactos a escala global superaron los del evento 1982-1983, que hasta ese momento gozaba de la triste fama de ser el más intenso. Como consecuencia, sus impactos sobre Cuba también fueron considerables, aunque en algunos casos quizás no resultaron tan intensos como se esperaba.

Durante el período lluvioso de 1997 se presentaron temperaturas máximas muy notables, en especial en los meses de agosto y septiembre, donde se alcanzaron nuevos récord de este elemento en varias estaciones. La distribución de la precipitación en el semestre mayo-octubre de 1997 fue muy irregular, existieron áreas con lluvias acumuladas por debajo de 75 y 50 % de los promedios históricos. El déficit de lluvias fue más agudo en la región oriental y para el mes de octubre resultó mucho más generalizado, cuando la mayor parte del país presentó acumulados mensuales por debajo de 50 % de la norma.

En correspondencia con los efectos del ENOS sobre el clima en Cuba, los totales de lluvias acumulados en el período noviembre-marzo estuvieron muy por encima de la norma y aunque esto pudiera parecer provechoso, las lluvias se produjeron en forma de episodios de poca duración y gran intensidad, lo que hizo que fueran poco aprovechables y además dañinas para muchas actividades. De hecho, al estar asociadas a la afectación de bajas extratropicales se vincularon con la ocurrencia de vientos fuertes, actividad eléctrica y otros fenómenos meteorológicos peligrosos.

A partir del mes de abril de 1998, una intensa sequía de corta duración se originó durante el trimestre abril, mayo y junio, y provocó el déficit más significativo registrado en los acumulados de las lluvias para estos meses desde 1941.

Los primeros síntomas de esta sequía comenzaron a reflejarse al cierre del período noviembre-marzo, cuando, a pesar del carácter lluvioso que tuvo, se apreciaron algunas áreas de la región oriental de Cuba que mostraron déficit de interés. Ya durante el mes de abril, los escasos acumulados de lluvia que se registraron en todo el país, originaron la aparición de grandes áreas con condiciones favorables para el desarrollo del proceso de sequía.

Este fenómeno quedó nacionalmente establecido en el mes de mayo, cuando se registraron déficit muy importantes en toda Cuba, principalmente en las regiones central y oriental. Al transcurrir junio (uno de los meses más lluviosos en el país) con un déficit considerable de precipitaciones, la sequía se hizo crítica y se convirtió en una de las más severas reportadas para Cuba.

No obstante las medidas de respuesta adoptadas con anticipación, los daños ocurridos en la agricultura, la producción azucarera y otras ramas de la economía fueron considerables. El impacto sobre la salud humana fue también apreciable. Pero la preparación realizada previamente logró su disminución con relación al evento ENOS 1982-1983 de forma significativa.

ADAPTACIÓN A LA VARIABILIDAD NATURAL DEL CLIMA

El análisis de los impactos asociados a la variabilidad climática actual puede ser utilizado para establecer medidas de adaptación apropiadas. De hecho, si se toma en cuenta que la adaptación es un proceso paulatino, las medidas identificadas para reducir los impactos de las variaciones climáticas actuales asegurarían una reducción continuada de la vulnerabilidad.

Actualmente, el avance alcanzado sobre el funcionamiento del sistema climático ha permitido elevar la capacidad de predecir los impactos de las anomalías climáticas que se producen como resultado de diferentes eventos de escala regional o global. Mucho se ha avanzado en el conocimiento del evento ENOS.

La capacidad de predecir con antelación las variaciones climáticas ofrece la posibilidad de poder actuar a tiempo y reducir los impactos adversos, es decir, adaptarse a los efectos de la variabilidad climática. El incremento de la preparación ante eventos climáticos extremos contribuye notablemente a la reducción de la vulnerabilidad.

Vigilancia y predicción climática

Con el propósito de anticipar estas variaciones temporales o cambios ocasionales en la marcha de las estaciones y ayudar a la sociedad a planificar en función de ellos, los científicos están buscando la forma de entender lo mejor posible las causas y principales características de las variaciones climáticas, así como la de crear modelos matemáticos que le permitan predecir el clima en el futuro inmediato. El objetivo es poner esta información al servicio de la sociedad y la economía. De tal forma, la vigilancia del clima y la predicción climática cobran gran importancia en el mundo de hoy y su desarrollo resulta indispensable.

La vigilancia del clima es un sistema de trabajo operativo que tiene la misión general de monitorear los estados pasados y actuales del clima, con el fin de evaluar el comportamiento de las variaciones climáticas e implementar sistemas de avisos tempranos. De tal forma el Sistema Nacional de la Vigilancia del Clima (SNVC) se estructura con la comprensión de que el clima es un recurso de importante uso dentro de las estrategias y planes de un país.

El SNVC es una de las vías principales de interacción con la comunidad de usuarios y facilita el flujo de información en los aspectos relacionados con las variaciones observadas en el clima y su impacto socioeconómico. A su vez, este sistema se nutre de una amplia cantidad y diversidad de datos e informaciones generadas en la red de observaciones de los servicios meteorológicos y de los datos existentes en los archivos de esas y otras instituciones.

En el caso de Cuba, el SNVC es un esfuerzo conjunto de varias áreas del Instituto de Meteorología que abarca desde la ejecución y transmisión de las observaciones meteorológicas, hasta la distribución de los productos resultantes de las evaluaciones climáticas. Los resultados científicos obtenidos al evaluar las variaciones, anomalías y tendencias observadas en el clima de forma global o regional, constituyen las bases científicas generales del SNVC.

Para el desarrollo del SNVC es necesario generar bases de datos y metodologías de trabajo, elementos que constituyen el soporte del sistema. Los vínculos entre vigilancia y predicción climática no sólo son muy estrechos, sino que además resultan indispensables.

El SNVC dota a los servicios de meteorológicos con el mecanismo necesario para interactuar favorablemente con la comunidad de usuarios y fomentar la consideración de la información climática en la planificación socioeconómica.

En Cuba, la principal vía para difundir las informaciones que genera el SNVC es el *Boletín de la Vigilancia del Clima* (BVC), que publica el Centro del Clima con una frecuencia mensual. Esta publicación contiene diversas informaciones sobre las variaciones climáticas observadas e incluye las predicciones mensuales de precipitación y temperaturas extremas. A través del BVC, se ofrecen informaciones especiales y alertas climáticas, que resumen las características de períodos de tiempo significativos y ofrecen predicciones sobre las condiciones climáticas esperadas.

La mejor estrategia de defensa ante las anomalías climáticas extremas es la preparación contra el riesgo, es decir, la adopción práctica de medidas de lucha proactivas o anticipadoras, que tengan en cuenta la repetición probable del fenómeno en cuestión y sus características de manifestación,

la vulnerabilidad de los elementos expuestos, y otros; así se evita la sorpresa y en consecuencia las medidas reactivas o improvisadas, que con frecuencia resultan contraproducentes e incompatibles con el principio de sustentabilidad.

En Cuba, en interés del «Programa de Cambios Globales y la Evolución del Medio Ambiente cubano», y del desarrollo del «Plan de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación y los efectos de la Sequía», se desarrolló un «Sistema Integrado para la Vigilancia, la Alerta Temprana y el Pronóstico de la Sequía en Cuba», el cual incluye todos los componentes básicos requeridos para su materialización operativa. El actual Sistema Integrado, se fundamenta en tres componentes básicas, la primera dirigida a realizar el diagnóstico de la sequía (meteorológica y agrícola), la segunda a la estimación de su posible evolución y la tercera al componente informativo.

La primera enfatiza en la distinción del escenario meteorológico y agrometeorológico integral en el que se configura y establece un evento de sequía, y se realiza sobre la base del análisis sistemático de distintos procesos meteorológicos, oceánicos, cosmogeofísicos e incluso de impactos (e indicadores que los representan) a diferentes escalas espaciales y temporales intervinclados.

La segunda se orienta a la estimación de la futura evolución de los principales procesos causales y moduladores de la sequía, la cual incluye la valoración de pronósticos de distintos campos meteorológicos y en particular, la utilización de pronósticos de la lluvia para los meses subsiguientes al inicio del evento, elaborados sobre la base de los modelos de pronósticos nacionales y los extranjeros más convenientes que se ofertan por centros de reconocido prestigio internacional. No obstante, los pronósticos en sí mismos, constituyen una herramienta básica en cualquiera de las fases de trabajo.

La tercera se encarga de presentar las diferentes salidas del sistema con fines de información pública y de servicios científico-técnicos.

Desde la primera versión del «Sistema Nacional de Vigilancia de la Sequía Meteorológica», se introdujo el uso de los deciles, técnica utilizada desde los años sesentas hasta hoy por el servicio meteorológico australiano y ampliamente difundida por el mundo por recomendación de la OMM, la cual se basa en el análisis estadístico de las series de los acumulados mensuales de las lluvias, mediante las distribuciones percentilica correspondientes.

A los efectos de la sequía meteorológica, el parámetro «cantidad de lluvia caída», constituye un consistente indicador, pues además de ser este el factor que mayormente afecta la disponibilidad de agua, es un elemento informativo de simple captación y manejo, propio para el establecimiento de sistemas capaces de facilitar el diagnóstico de la sequía en tiempo casi real y conocer su dinámica en las escalas temporales y espaciales más convenientes, integrados en un Sistema General de la Vigilancia del Clima.

El uso del decil/percentil como índice posee la utilidad práctica de que ellos expresan el grado de la lluvia sobre un período dado dentro de la distribución de frecuencia sin especificar la cantidad de lluvia. Se decidió utilizar la siguiente interpretación:

Clasificación en tiempo	Frecuencia	Rango decil
Muy por encima de la norma	superior al 90	10
Bastante por encima de la norma	80-90	9
Por encima de la norma	70-80	8
En la norma	30-70	4 -7
Por debajo de la norma	20-30	3
Bastante por debajo de la norma	10-20	2
Muy por debajo de la norma	inferior al 10	1

Antes del año 1990 unos pocos países confeccionaban y emitían predicciones climáticas. De forma general estas predicciones eran poco utilizadas en el momento de adoptar decisiones en las esferas económicas y sociales. Sólo el pronóstico del tiempo era frecuentemente aplicado en las planificaciones diarias o semanales. Los recientes avances tecnológicos dedicados a pronosticar el clima en la escala estacional o interanual permitieron realizar útiles predicciones acerca de la evolución del fenómeno EL NIÑO 1997-1998 y de sus efectos climáticos. Esto propició que muchos decisores de políticas se percataran de la utilidad potencial de este tipo de predicción y se creara la posibilidad de dar un fuerte impulso a esta actividad a escala global.

La predicción climática es aquella que prevé las condiciones medias del clima para plazos de duración desde un mes hasta uno o dos años.

En la práctica se distinguen dos grandes grupos: los que hacen pronósticos del valor del elemento en cuestión, pronósticos determinísticos; y los que pronostican la probabilidad de ocurrencia de cierto valor del elemento, pronósticos probabilísticos. Los pronósticos tanto de un grupo como de otro se pueden realizar sobre un valor particular del elemento o sobre una categoría o intervalo, que se logra comúnmente a partir de la distribución percentilica del predictando. Así, existen pronósticos probabilísticos y determinísticos de categorías y valores.

Realmente grande es la variedad de métodos de pronóstico en la predicción climática, ya que estos se diferencian de acuerdo con varios criterios y existen múltiples enfoques mixtos. La diferenciación o clasificación de los métodos puede realizarse a partir de las características del espacio predictor o respecto a la herramienta fundamental que se utiliza. Así, existen dos grupos fundamentales. El primero de ellos lo constituyen los modelos dinámicos o numéricos que parten de un estado medio inicial de la atmósfera y llegan a un estado final mediante la solución numérica del sistema de ecuaciones de la hidrodinámica. Entre estos se encuentran los modelos climáticos a escala global.

Un segundo grupo lo constituyen los modelos estadísticos, hasta ahora predominantes en los plazos más cortos y para regiones pequeñas, que parten de relaciones estadísticas entre los conjuntos de las variables a pronosticar (predictandos) y aquellas que se utilizarán para pronosticar las primeras (predictores). Dentro de estos pronósticos existe un grupo que realiza la predicción partiendo de la modelación del predictando sin considerar relaciones físicas o estadísticas con otras variables predictoras, esto es, basándose solamente en el análisis de la serie temporal.

La confección y uso de las predicciones climáticas se han comenzado a generalizar en el decenio de 1990 y principalmente desde la ocurrencia del evento ENOS 1997-1998. Se encuentran principalmente dirigidas a prever las anomalías de temperatura y precipitación que se han de producir durante intervalos de tiempo de un mes, tres meses y seis meses, las que pueden ser denominadas como predicciones climáticas mensuales, intraestacionales y estacionales, respectivamente.

Gran interés posee la predicción del evento ENOS por ser este el principal modulador de la variabilidad climática conocido hasta el momento. De forma general, una parte importante de las predicciones climáticas que se realizan dependen de aquellas que se refieren al evento ENOS. Un ejemplo característico es el pronóstico estacional de los ciclones tropicales en el Océano Atlántico.

Los modelos actuales de predicción sobre el ENOS no son tan confiables como aquellos utilizados en el pronóstico del tiempo, pero han avanzado lo suficiente al punto de estar en condiciones de reproducir las características de un evento típico y sus efectos en los patrones del tiempo y el clima a lo largo del mundo, con suficiente anticipación como para hacer útiles las pre-

dicciones que se emitan. Los resultados obtenidos hasta el momento, aunque de ninguna manera perfectos, proveen una mejor indicación de las condiciones climáticas que prevalecerán durante una o dos estaciones, que asumir que tanto la precipitación como la temperatura serán normales.

Hasta aquí se ha explicado brevemente el impacto económico y social que posee la variabilidad climática. Para mitigar ese impacto se requiere poseer información oportuna y confiable acerca de las variaciones que se están produciendo en el clima y de aquellas que pudieran ocurrir en el futuro inmediato. La habilidad de adelantarse a la forma en que cambiará el clima de una estación a otra, o de un año a otro, conducirá a un mejor manejo de la agricultura, del abastecimiento de agua, de las pesquerías y de otros recursos.

También tiene una notable importancia para otros sectores económicos y sociales como la planificación para casos de desastres, la salud y la industria del seguro. Los países tropicales son los que más provecho pueden obtener con el uso de la vigilancia y la predicción climática. Ellos están ubicados en aquella parte del mundo donde los modelos de predicción del clima parecen ser más confiables hasta el momento, mientras que reciben una desproporcionada porción de los efectos que produce el evento ENOS.

A través de la incorporación de la predicción del clima en las decisiones de ordenamiento, la humanidad viene adaptándose mejor a la irregularidad de los ritmos climáticos.

Capacidad institucional para actuar ante eventos climáticos extremos

El notable impacto del huracán Flora a la región oriental de Cuba, fue un claro motivo para que el Gobierno cubano fortaleciera la política de la voluntad hidráulica en el país y se construyera un número importante de presas y obras hidráulicas, las cuales permitirían reducir el peligro de las inundaciones y garantizarían la existencia de reservas de agua para enfrentar períodos de sequía.

En el marco de esta acción se produjo también el desarrollo de la red de observaciones hidrológicas y se fortaleció significativamente el Sistema Meteorológico Nacional. Como complemento del incremento y modernización de las redes de observación, se desarrolló la concepción actual de la Defensa Civil de Cuba, que ha contribuido a la preservación de numerosas vidas humanas y recursos económicos del país.

Los principales logros que presenta el sistema de respuesta ante los impactos de las anomalías climáticas, parten de la existencia de una estructura centralizada que garantiza la participación de todos los niveles de la sociedad. El hecho de que el Sistema Nacional de Defensa Civil se inserte dentro de los planes generales para la defensa del país, garantiza un nivel alto de respuesta y de disponibilidad de recursos.

La principal virtud del sistema de respuesta cubano es que pone como principal prioridad la preservación de la vida humana, aún a costo del empleo de importantes recursos materiales. La estrecha conexión de los tomadores de decisiones con los centros que integran la red de vigi-

lancia, garantiza el intercambio de información entre los diferentes niveles y facilita la adopción de medidas más efectivas y coherentes.

El papel que juegan los medios de difusión en el intento de lograr una percepción popular más clara sobre de los diferentes eventos relacionados con el clima, también constituye un aspecto a destacar. Esto también resulta de gran ayuda en la ejecución de los planes de preparación y respuesta.

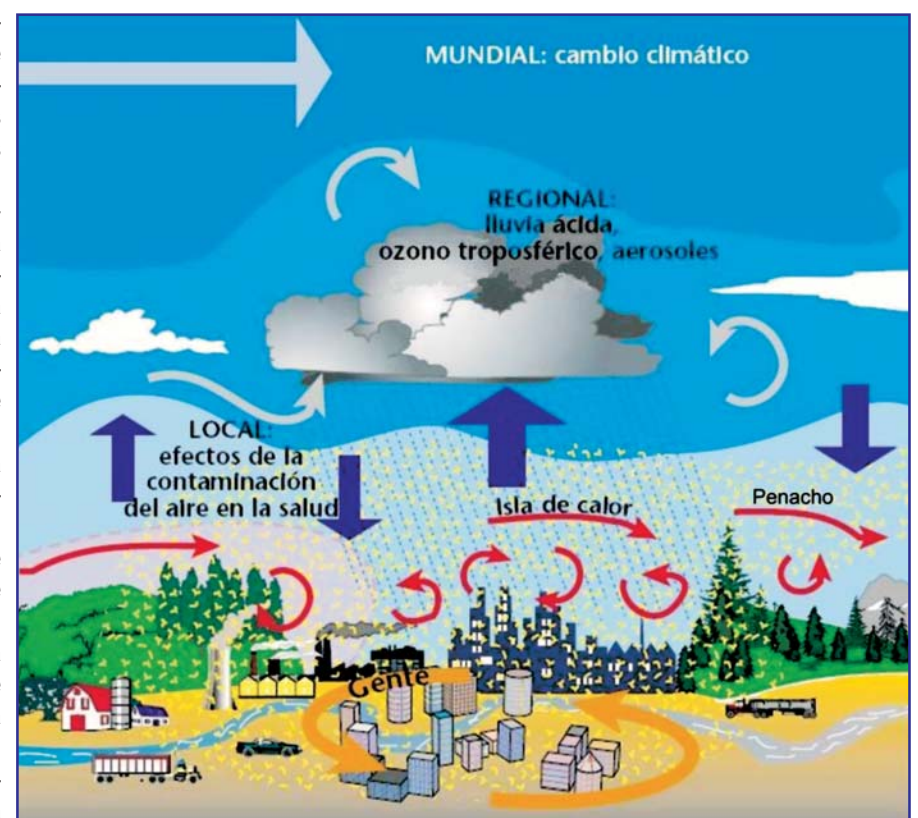
Es importante señalar que las acciones emprendidas por el Gobierno de Cuba después de la afectación del huracán Flora, pueden considerarse como ejemplos de adaptación a la variabilidad climática. Esas acciones condujeron de manera positiva a reducir la vulnerabilidad del país, pues a pesar de que el nivel de exposición ha aumentado debido al propio desarrollo socioeconómico, la preparación de la sociedad ha sido el factor fundamental en la reducción de pérdidas.

EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DERIVADAS DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS Y SU IMPORTANCIA PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO

En esta sección se analizan algunas interrogantes frecuentes relacionadas con los gases de efecto invernadero (GEI) y la importancia que tienen para el calentamiento global y el cambio climático, el incremento de sus concentraciones atmosféricas como consecuencia de actividades del hombre. En lo fundamental se siguen elementos sobre este tema expuestos por López, 2006.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y CAMBIO CLIMÁTICO

Como es conocido, la atmósfera de la Tierra está compuesta por el aire, este se define como una mezcla de gases, y por partículas de una amplia variedad de elementos y compuestos químicos. Entre los constituyentes de la atmósfera se les denomina *principales* a aquellos que tienen una concentración relativa, igual o mayor que 1 % en volumen (nitrógeno, oxígeno y argón, este último aproximadamente), y constituyentes *trazas* a los de concentración inferior a 1 %, donde se incluye el



(Fuente: WMO, 2003).

Fig. 7. Interrelaciones de problemas de contaminación atmosférica de diferente escala.

resto de los gases, entre estos los GEI, y las partículas. Los gases trazas, de conjunto, representan aproximadamente solo 0,12 % de la composición del aire seco (no se considera el vapor de agua). Sin embargo, pese a sus muy pequeñas concentraciones en la atmósfera tienen gran importancia para la vida en el planeta.

Las emisiones de contaminantes a la atmósfera, derivadas de las actividades humanas, entre otros efectos, han provocado el incremento de las concentraciones atmosféricas de diferentes gases trazas, por encima de sus niveles naturales y a ritmos tales que están conduciendo a importantes cambios en las propiedades químicas y radiativas de la atmósfera, entre otros problemas relacionados con el medio ambiente atmosférico.

De acuerdo con el tiempo de vida de los diferentes contaminantes en la atmósfera, así originarán problemas globales (mundiales), regionales o locales. Estos problemas, aunque son de diferente escala, se asocian a varios niveles de contaminación y tienen distintos efectos; sin embargo están fuertemente interrelacionados y tienen un origen común, las emisiones de contaminantes a la atmósfera.

El incremento del efecto invernadero y sus efectos sobre el calentamiento global y el cambio climático, así como el agotamiento del ozono en la estratosfera, son dos problemas globales típicos derivados del incremento de las concentraciones de gases de larga vida en la atmósfera como consecuencia de actividades humanas. Otros ejemplos de problemas importantes que tienen la misma causa anterior, pero que tienen un carácter regional y no global, son la acidificación de la lluvia, el incremento de las concentraciones de ozono troposférico y otros (Fig. 7).

EFFECTO INVERNADERO

¿Tiene el efecto invernadero causas naturales o es consecuencia de las actividades humanas?

La Tierra tiene un *efecto natural de invernadero* debido a la presencia en la atmósfera de cantidades trazas de vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) que se producen de forma natural. Esos gases absorben y reemiten radiación en longitudes de ondas específicas dentro del espectro de radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, la atmósfera y las nubes. Los gases que poseen esa propiedad son conocidos como los GEI.

Es importante distinguir el efecto invernadero natural del efecto invernadero incrementado por las actividades humanas. El *efecto invernadero natural* es el aumento de la temperatura provocado por las cantidades naturales de GEI presentes en la atmósfera. Por esta causa la superficie de la Tierra es, aproximadamente, 33°C más caliente que lo que sería sin ese efecto natural y posibilita la vida en nuestro planeta tal y como la conocemos.

El *efecto invernadero incrementado* se refiere a los resultados del aumento, por las actividades humanas, de las concentraciones atmosféricas de esos gases naturales, y otros GEI totalmente creados por el hombre [por ejemplo los clorofluorocarbonos (CFCs) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFCs)], y que han conducido al incremento de la temperatura media global de la superficie terrestre. Este calentamiento global y el cambio climático asociado constituyen las mayores amenazas y retos globales a los que se enfrenta la humanidad en este siglo.

Como se precisa en el último informe de evaluación del IPCC¹ (Solomon *et al.*, 2007), las evidencias disponibles, a partir de los resultados de mediciones y modelos, confirman que la mayor parte del incremento observado en la temperatura media de la superficie terrestre, desde el último siglo, es muy probable sea debido al incremento de las concentraciones at-

mosféricas de los gases de efecto invernadero de larga vida (GEILV) derivados de las actividades humanas.

¿Los gases de invernadero modifican el balance energético del sistema climático?

El *forzamiento radiativo* es una medida de la influencia que tiene un determinado factor (natural o humano) en la modificación del equilibrio existente entre la energía entrante y saliente en el sistema atmosférico de la Tierra. También representa un índice de la importancia del factor para el cambio climático. Si el forzamiento radiativo es positivo, contribuye al aumento de la temperatura media superficial mundial, y si es negativo a su disminución.

Las modificaciones del balance energético del sistema climático pueden provenir de cambios en la radiación solar, de cambios en el albedo² de la Tierra por modificaciones en las propiedades de la superficie terrestre, o de cambios en los gases y partículas presentes en la atmósfera. Entre todos esos factores el dominante en el forzamiento radiativo del clima, en la era industrial, es el aumento de las concentraciones atmosféricas de varios GEILV.

¿Todos los gases de invernadero influyen de igual forma sobre el calentamiento global?

Cada GEI, de acuerdo con su estructura química y capacidad para absorber y emitir radiación infrarroja, tiempo de vida en la atmósfera y otras propiedades, tiene diferente Potencial de Calentamiento Global (PCG). Los PCG proporcionan una métrica para comparar el impacto climático de los diferentes gases de invernadero y constituyen una medida del efecto radiativo relativo de una sustancia dada comparada con otra. Un PCG compara el forzamiento radiativo de una tonelada de un GEI sobre un período dado de tiempo (por ejemplo 100 años) con el forzamiento radiativo de una tonelada de CO₂.

Aunque los valores propuestos para los PCG de algunos gases han experimentado cambios en los últimos años, por convenio se utilizan los incluidos en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC de 1995 y que por ejemplo, corresponden a: 1 para el CO₂; 21 para el CH₄ y 310 para el N₂O. Se asume el valor 1 para el CO₂ por lo que esos gases tienen, respectivamente, un potencial de calentamiento 21 veces y 310 veces mayor al del CO₂. En los inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero, los PCG son utilizados para expresar las emisiones en equivalentes de CO₂ (ej. Teragramos CO₂ equivalente)³ y que no son más que el producto de la emisión de un gas en unidades de masa (ej.: Teragramos) por su respectivo PCG.

¿Cuáles son los GEI de mayor importancia para el cambio climático?

Existen en la atmósfera una gran cantidad de GEI directos o indirectos (estos últimos conocidos también como precursores). Aunque todos tienen importancia para el clima y/o los procesos de la contaminación y la química atmosférica, no todos son relevantes para los procesos relacionados con el calentamiento global y el cambio climático. Para esos procesos son más importantes los GEI directos que tienen:

- Largo tiempo de vida relativo en la atmósfera (les posibilita distribuirse y mezclarse bien en la atmósfera, y con mayor rapidez de lo que se remueven de esta).
- Alto nivel de potencial de calentamiento atmosférico.
- Fuentes (directas o indirectas) importantes en las actividades humanas.

- Composición química favorable (por ejemplo cantidad de cloro y/o bromo contenido en cada molécula para los GEI que también son sustancias agotadoras del ozono).
- Un volumen significativo de emisiones a la atmósfera.

¿Gases de invernadero mayores y menores?

De los GEI más importantes, en la actualidad varios son controlados por la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y su Protocolo de Kyoto, y otros por el Protocolo de Montreal sobre las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono (SAO), debido a que además de GEI son también SAO. Esta subdivisión tiene entre sus causas principales la no duplicación de actividades entre ambos convenios internacionales. Asimismo, en la atmósfera están también presentes otros GEI no controlados por los convenios anteriores que reciben atención científica; por ejemplo, en el marco de los reportes del IPCC o sus metodologías para la preparación de inventarios, se incluyen algunos para los que aún no se disponen resultados científicos en relación con el valor de su PCG.

Entre toda esa gran cantidad de GEI presentes en la atmósfera, cinco son conocidos como *Gases Mayores de Efecto Invernadero de Larga Vida* y aportan cerca de 97 % del incremento del forzamiento radiativo directo de los GEILV desde 1750. Estos son, por orden de importancia: CO₂, CH₄, N₂O que se encuentran bajo control de la CMNUCC y su Protocolo de Kyoto, y los CFC clorofluorocarbono 11 (CFC-11) y clorofluorocarbono 12 (CFC-12) que se regulan por el Protocolo de Montreal Sobre Sustancias Agotadoras del Ozono (Tabla 1). El restante 3% del incremento del forzamiento radiativo es aportado por 10 *Gases Halogenados Menores de Efecto Invernadero de Larga Vida* (Tabla 1). De estos GEI menores, excluyendo al hidrofluorocarbono 134a (HFC-134a) y al hexafluoruro de azufre (SF₆), que no contienen cloro o bromo, el resto son también SAO.

Tabla 1. Gases de efecto invernadero de mayor importancia para el cambio climático

	CMNUCC (*) y su Protocolo de Kyoto	Protocolo de Montreal (**)
GEI de larga vida "mayores"	CO ₂ ; CH ₄ ; N ₂ O	CFC-11; CFC-12
GEI de Larga Vida "Menores"	HFC-134a SF ₆	CFC-113; tetracloruro de carbono (CCl ₄); metilclorofloro (CH ₃ CCl ₃); HCFC-22; HCFC-141b y halones 1211 y 1301 (***)
Otros GEI de Importancia	Otros hidrofluorocarbonos (HFCs); perfluorocarbonos (PFCs)	Otros hidroclorofluorocarbonos (HCFCs)
GEI indirecto (precursores)	NO _x ; CO; COVDM; SO ₂	

* CMNUCC-Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático
** Protocolo de Montreal sobre Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono
*** Los halones son compuestos del bromo que se utilizan fundamentalmente como agentes para la extinción de incendios.

En la tabla 1 también se mencionan otros GEI de importancia, así como los siguientes gases precursores: óxidos de nitrógeno (NO_x); monóxido de carbono (CO); compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM) y dióxido de azufre (SO₂). La importancia de estos últimos viene dada por su papel como precursores de GEI (especialmente del ozono troposférico), modificadores de sus concentraciones en la atmósfera o precursores de partículas atmosféricas (como es el caso del SO₂).

CONCENTRACIONES DE GASES DE INVERNADERO EN LA ATMÓSFERA

¿Cómo ha evolucionado el nivel de concentraciones atmosféricas de los principales gases de invernadero desde la época preindustrial?

De los GEI mayores, el CO₂, CH₄ y N₂O aportan de conjunto 88 % del incremento del forzamiento radiativo observado en la época industrial, motivo por el cual centran la atención de la CMNUCC y su Protocolo de Kyoto. A continuación se describen algunas las principales características de los principales GEI.

Dióxido de Carbono (CO₂)

El CO₂ es el GEI más importante, y el más común producido por las actividades humanas. Es el que más contribuye al calentamiento global, aporta cerca de 63 % del incremento en el forzamiento radiativo total de los GEILV en la época industrial. Durante la época preindustrial, y durante cerca de 10 000 años, las concentraciones atmosféricas de este GEI se mantuvieron a un nivel cercano a los 280 ppm.⁴ En los últimos 200 años este nivel se ha incrementado notablemente, pues alcanzó un valor medio global de 381,2 ppm a finales del 2006 (36 % de aumento en las concentraciones en relación con la época preindustrial) (WMO, 2007). Ese nivel de concentración en el 2006 excede también, notablemente, el rango de concentraciones naturales de este gas en los últimos 650 000 años (entre 180 y 300 ppm). Su abundancia en la atmósfera representa un balance de los flujos de este gas entre la atmósfera y la biosfera (absorciones por la fotosíntesis y emisiones por la respiración y descomposición de las plantas) y entre la atmósfera y el océano (intercambio físico de CO₂). Ese crecimiento en las concentraciones es debido, sobre todo, a la quema de combustibles fósiles para energía y, en relativamente menor grado, a la deforestación.

Metano (CH₄)

El CH₄ es el segundo GEI en importancia (aporta 18,6 % del incremento en el forzamiento radiativo directo desde 1750 debido a los GEI de larga vida afectados por las actividades humanas). Además, influye indirectamente sobre el clima con alta incidencia sobre el ozono en la troposfera, el vapor de agua en la estratosfera y la capacidad oxidante de la atmósfera. Aunque sus emisiones son menores que las del CO₂ su potencial de calentamiento global es 21 veces la de este último en un horizonte temporal de 100 años.

El valor de fondo preindustrial para las concentraciones de metano en la atmósfera parece ser cercano a 715 ppb⁵. Esta concentración excedió su duplicación en los últimos 200 años, ha alcanzado los 1 782 ppb a finales de 2006 (155 % de incremento en relación con 1750) (WMO, 2007). La concentración reportada para el 2006 significa una disminución de 1 ppb desde el 2005 y 2 ppb desde el 2003, aunque excede notablemente el rango natural de variación de este gas para los últimos 650 000 años (entre 320 y 790 ppb). Actualmente, algo más de 60 % del CH₄ presente en la atmósfera procede de las actividades humanas, entre estas: el cultivo del arroz, el ganado doméstico, la gestión de los desechos sólidos y líquidos, las actividades del petróleo y gas natural, y otras.

Óxido Nitroso (N₂O)

El N₂O es el tercer GEI en importancia y desempeña un importante papel en la química de la estratosfera. Este contribuye con alrededor de 6,2 % del incremento del forzamiento radiativo total de los GEI de larga vida. Es emitido hacia la atmósfera desde procesos naturales y

Tabla 2. Concentraciones atmosféricas del CO₂, CH₄ y N₂O a finales del año 2006.

	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)	N ₂ O (ppb)
Concentración media global	381,2	1782	320,1
Cambio en la concentración en relación con el año 1750	136 %	255 %	119 %
Incremento absoluto 2005 -2006	2,0	-1	0,8
Incremento relativo 2005 - 2006	0,53 %	-0,06 %	0,25 %
Incremento medio anual absoluto durante los últimos 10 años	1,93	2,4	0,76

Fuente: WMO, 2007.

las actividades humanas, entre estas la agricultura, el manejo de los desechos líquidos, los cambios de uso de la tierra y otras. Como resultado de las actividades del hombre, sus concentraciones aumentaron desde cerca de 270 ppb en la época preindustrial hasta cerca de 320,1 ppb a finales de 2006 (WMO, 2007), lo que representa 19 % de incremento.

En la tabla 2 se resumen las principales características que presentaban las concentraciones de estos tres GEI a finales del 2006.

Halocarbonos

Los halocarbonos son compuestos del carbono que contienen uno o más halógeno (es decir, fluor, cloro, bromo o yodo). Son gases de invernadero muy efectivos y algunos también actúan como sustancias agotadoras del ozono (los halocarbonos que contienen cloro y bromo). Entre estos compuestos se tiene a los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), que son GEI que tienen su origen, totalmente, en actividades humanas y una gran variedad de aplicaciones.

Los niveles atmosféricos de los CFC aumentaron en las décadas de los años 70 y 80 del siglo pasado, pero en la actualidad prácticamente ha cesado su incremento como resultado de las regulaciones de producción y emisión bajo el Protocolo de Montreal sobre las sustancias que agotan la capa de ozono y los procesos naturales de remoción. Aunque sus concentraciones

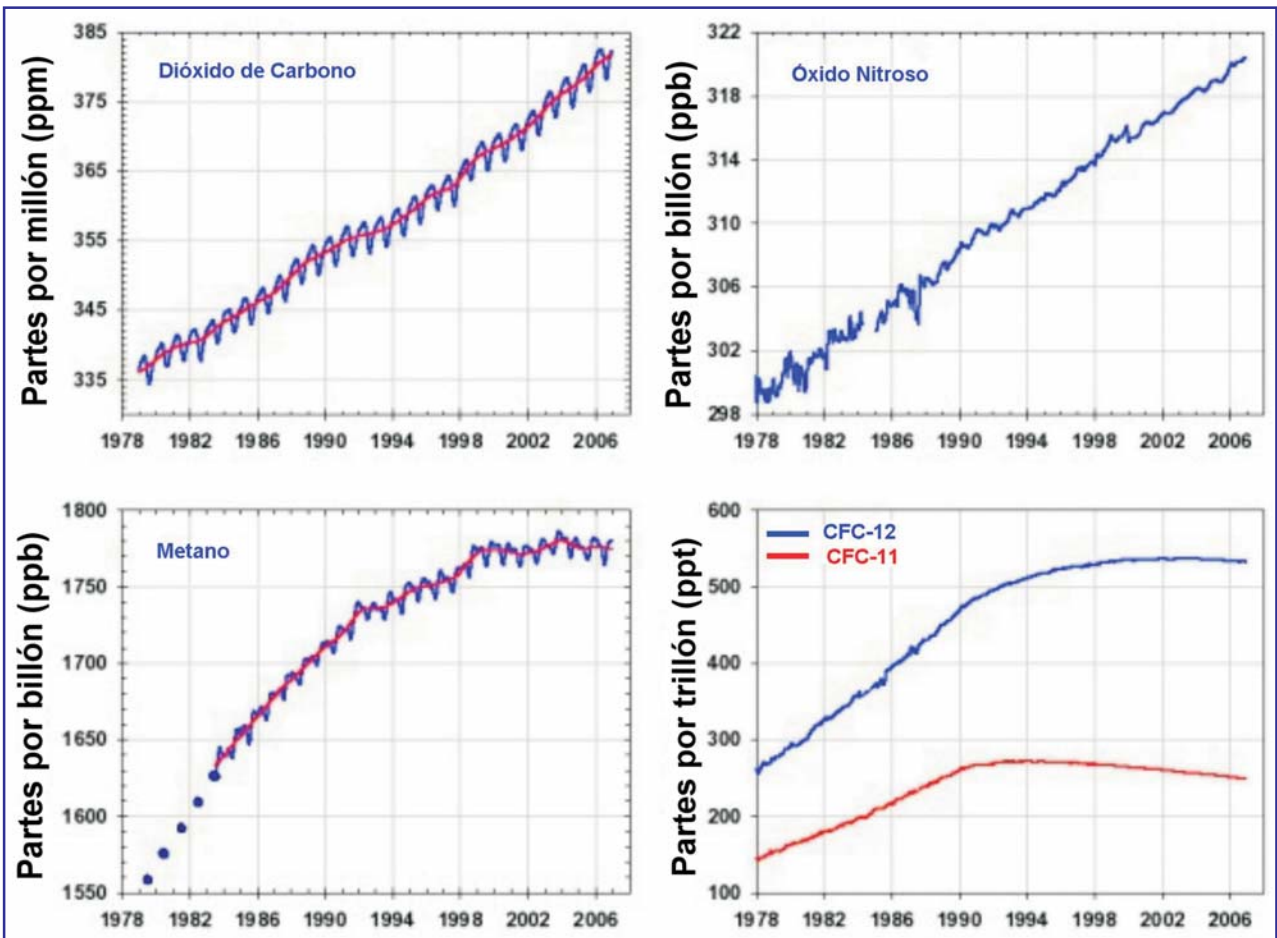
están disminuyendo lentamente, su contribución al forzamiento radiativo global derivado de los GEILV es significativa (12 % del total). Por el contrario, las concentraciones de algunos de los sustitutos industriales de los CFC como los hidroclorofluorocarbonos (HCFC), por ejemplo HCFC-141b y HCFC-142 b, aumentan con rapidez. Estos GEI son fuertes absorbedores de radiación infrarroja y tienen alto potencial de calentamiento global, aunque su nivel de concentración en la atmósfera es aún relativamente bajo.

¿Están aumentando las concentraciones atmosféricas de todos los GEI principales?

En general no hay muchos cambios, según las tendencias observadas, en las concentraciones atmosféricas de los GEILV en los últimos años (Fig. 8). De los cinco mayores GEILV, las concentraciones del CO₂ y el N₂O continúan incrementándose a un ritmo regular en correspondencia con el comportamiento de las emisiones de estos gases.

A diferencia de lo anterior, en las últimas dos décadas las tasas de crecimiento del CH₄ en la atmósfera generalmente han disminuido, por lo que su aporte al forzamiento radiativo ha sido aproximadamente constante en esa etapa. Las causas de estos cambios en las tasas de crecimiento de este GEI aún no se comprenden bien (Solomon *et al.*, 2007). No obstante, este declive en la tasa de crecimiento del CH₄ implica que, en la actualidad, las emisiones se corresponden con las remociones, estas últimas asociadas en buena medida a la acción oxidante del radical hidroxilo (OH) en la atmósfera.

También la tasa de crecimiento de los CFC ha disminuido ligeramente en correspondencia con las acciones puestas en práctica por el Protocolo de Montreal; pero por otra parte, las concentraciones de los gases industriales fluorados incluidos en la CMNUCC y su Protocolo de Kyoto, los hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆) son relativamente pequeñas, aunque crecen con rapidez.



(Fuente: Hofman, 2007).

Fig. 8. Tendencias de las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero mayores. Nota: Las unidades para los CFC en ppt (partes por trillón)⁶

Tabla 3. Comportamiento reciente de las concentraciones atmosféricas de los principales GEI

GEI		TENDENCIA DE LAS CONCENTRACIONES ATMOSFÉRICAS
CO ₂	+	Concentración aumentando linealmente en ambos hemisferios. La tasa de crecimiento se ha incrementado a partir de 1995.
CH ₄	-	Concentración aproximándose a un estado estacionario. La tasa de crecimiento disminuyó desde finales de los años 80.
N ₂ O	+	Concentración aumentando linealmente en ambos hemisferios con una tasa de crecimiento relativamente uniforme.
CFC - 12	-	La tasa de crecimiento ha disminuido desde 1990 y ahora es prácticamente cero.
CFC - 11; CH ₃ CCl ₃	-	La concentración alcanzó el máximo alrededor de 1992-1993. Disminuye lentamente a partir de esa fecha.
CCl ₄	-	La concentración alcanzó el máximo en 1991. Disminuye lentamente desde esa fecha.
SF ₆ ; HCFC-141b; HCFC-142 b; HCFC-22; HFC- 134 a	+	Concentraciones aumentando.

En la tabla 3 se describe el comportamiento reciente de las concentraciones atmosféricas de los principales GEI.

¿Cuál es el aporte actual de los principales gases de invernadero al forzamiento radiativo del sistema climático?

Los datos disponibles más actuales del Índice Anual de Gases de Invernadero (AGGI) de la NOAA (Hofman, 2007) muestran que entre los años 1990 y el 2006 el forzamiento radiativo atmosférico por todos los GEILV se ha incrementado en 22,7 % (el índice alcanzó el valor de 1,23 en el 2006 y se asume el valor de 1 para el año 1990) (Fig. 9). Debe resaltarse, que en ese mismo período el incremento en el forzamiento radiativo del CO₂, solamente, fue cercano a 32 %, sin embargo este fue atenuado por la reducción en el crecimiento del CH₄ y la disminución de los CFC, lo que influyó decisivamente en el valor alcanzado por el forzamiento radiativo neto cercano a 23 %.

EMISIONES Y REMOCIONES DE GASES DE INVERNADERO

¿Cuáles son las principales actividades del hombre de las que se derivan emisiones y remociones de gases de invernadero?

Una parte importante de las actividades que realiza el hombre generan emisiones directas o indirectas de GEI. En otras se favorecen las remociones de CO₂ desde la atmósfera. Entre estas actividades hay un grupo que, por su importancia, centran la atención en las estimaciones que se realizan en los inventarios nacionales de emisiones y remociones de GEI, y que se agrupan en seis grandes sectores (Fig. 10).

¿Qué son los sumideros?

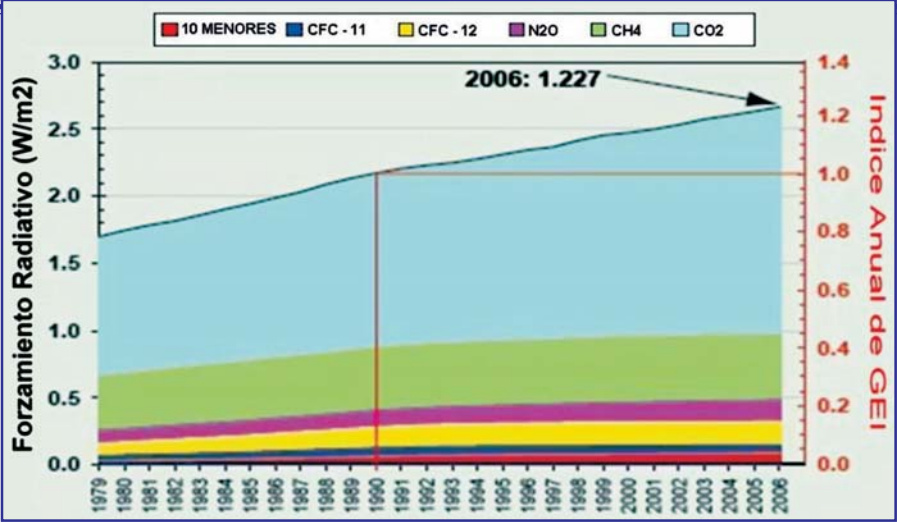
En el contexto de las CMNUCC se considera como *sumidero* a cualquier proceso, actividad o mecanismo que *remueve* de la atmósfera un GEI, precursor de GEI, o aerosol. Por *depósito* se entiende uno o más componentes del sistema climático en que está almacenado un GEI o precursor de GEI. Diferentes sumideros naturales remueven el CO₂ desde la atmósfera. La actividad humana puede reducir o incrementar estos procesos. En la figura 11 se identifican las vías principales para el secuestro y/o el almacenamiento intencionales del CO₂ atmosférico y los tipos potenciales principales de sumideros donde pueden ocurrir estos procesos.

En relación con las remociones de GEI, los bosques desempeñan un papel clave en el balance del CO₂ a nivel mundial mediante su absorción desde la atmósfera y su fijación en la madera, mediante la fotosíntesis y la fijación del carbono en el suelo. La deforestación, que consiste en la conversión de los bosques en tierras de cultivos, pastos permanentes u otros usos de la tierra, se manifiesta principalmente en las zonas tropicales y ocasiona grandes emisiones de dióxido de carbono y otros gases de invernadero junto con la destrucción de uno de los ecosistemas más valiosos del mundo y reservorio clave para el almacenamiento del carbono. Se estima que la deforestación aportaba 20 % de las emisiones anuales globales de GEI a finales de los años 90.

EMISIONES GLOBALES DE GASES DE INVERNADERO

¿Aumentan o disminuyen las emisiones globales de gases de invernadero?

En la CMNUCC se clasifica a las Partes que la integran en tres grupos principales de acuerdo con sus diferentes compromisos (Fig. 12). Los datos de emisiones de GEI disponibles, de mayor calidad y actualidad, provienen, mayormente, de los países industrializados que tienen entre sus compromisos con la CMNUCC, preparar y reportar anualmente sus inventarios nacionales de emisiones y remociones de GEI a partir del año base 1990, y así han venido cumplimentándolo. El último reporte disponible, hasta el momento, corresponde al 2005 (UNFCCC, 2007).



Fuente: Hofman, 2007.

Fig. 9. Comportamiento del Índice Anual de Gases de Invernadero (AGGI) para el periodo 1979-2006.

Las Partes no Anexo I (mayormente países en desarrollo) no tienen, entre sus compromisos con la CMNUCC, la obligación de preparar y reportar sus inventarios de emisiones y remociones de GEI anualmente. Esto hace que la mayor parte de los reportes de emisiones disponibles para los países en desarrollo, salvo excepciones, correspondan en su mayoría a los años 1990 y 1994 utilizados, alternativamente, como año base en los inventarios de estos países.

Se estima que entre 1970 y el 2004, las *emisiones agregadas* globales de CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆ ponderadas por su potencial de calentamiento global se incrementaron en 70 % (24 % entre 1990 y 2004), desde 28 700 a 49 000 Tg CO₂ equivalente (IPCC, 2007). Debe señalarse que esta estimación de emisiones no incluye las remociones de carbono, pero sí las emisiones derivadas del uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y la silvicultura (UCUTS). Las emisiones de esos gases aumentaron a diferentes tasas. Por ejemplo, las emisiones de CO₂ crecieron entre 1970 y 2004 en cerca de 80 % (28 % entre 1990 y 2004) y representaron 77 % de las emisiones de GEI derivadas de las actividades humanas en el 2004. El mayor crecimiento de las emisiones globales en ese período provino del sector de suministro de energía.

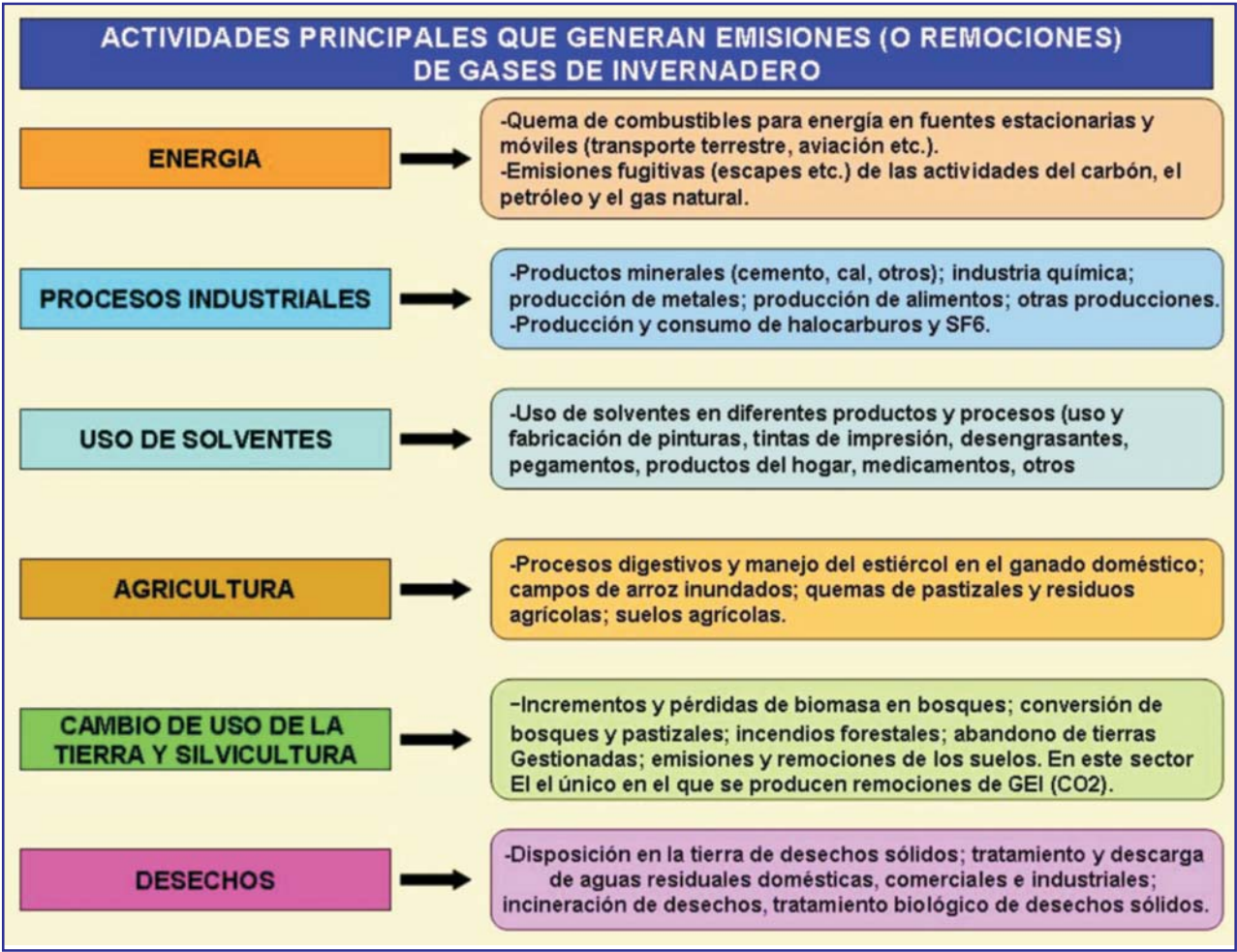


Fig. 10. Principales actividades del hombre que generan emisiones o remociones de gases de invernadero.

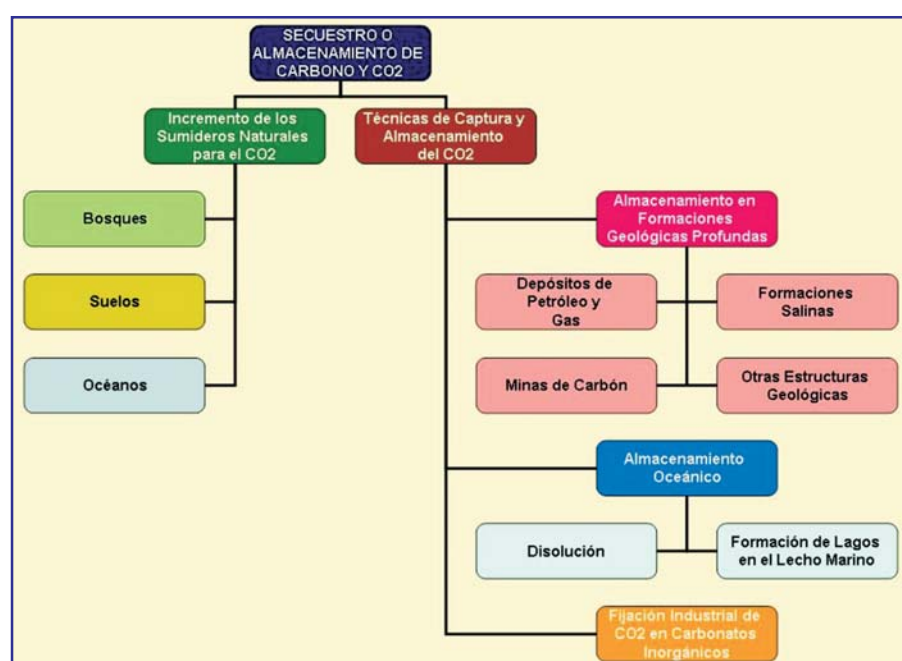


Fig. 11. Vías principales para el secuestro y/o almacenamiento intencional del CO₂ atmosférico y los tipos potenciales principales de sumideros donde pueden ocurrir estos procesos.

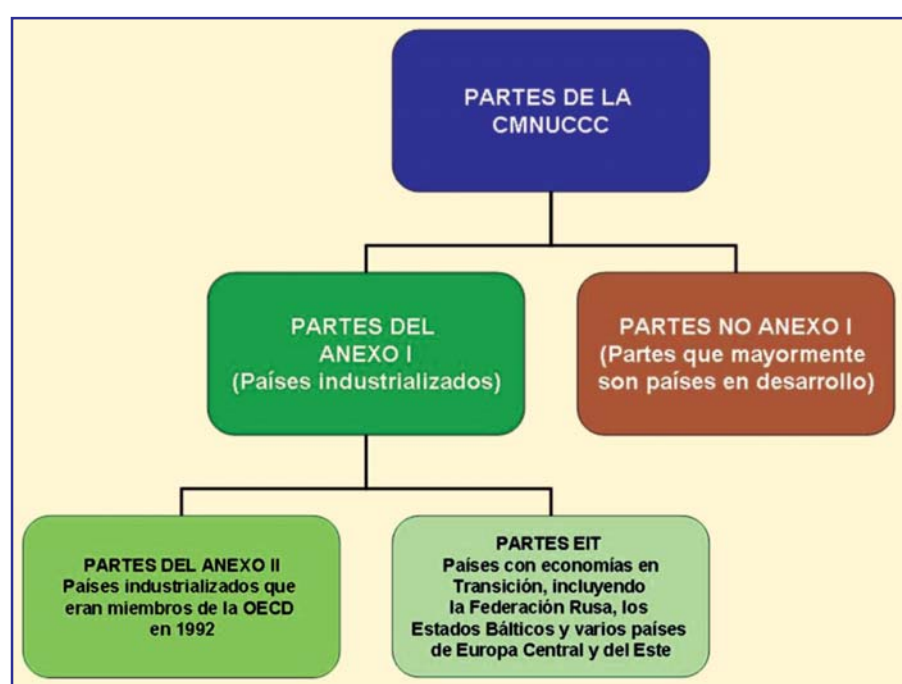


Fig. 12. Subdivisión de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático de acuerdo con sus diferentes compromisos en esta.

¿Cómo se comportan las emisiones de gases de invernadero de los países industrializados?

De acuerdo con el último reporte disponible de los inventarios nacionales de emisiones y remociones de GEI de los países industrializados (UNFCCC, 2007), las emisiones agregadas totales de todas las Partes del Anexo I de la CMNUCC, tomadas de conjunto y sin considerar las emisiones y remociones del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura (UCUTS), disminuyeron en 2,8 % entre 1990 y 2005 (desde 18 709,2 hasta 18 181,2 Tg CO₂ equivalente). Este resultado se deriva de la combinación del crecimiento experimentado en las emisiones por las Partes del Anexo I no EIT (países más industrializados), y que alcanzó 11 % en ese período, y el decrecimiento de las emisiones en las Partes del Anexo I EIT, y que fue de 35,2 % entre 1990 y 2005 (Fig. 13).

En las emisiones de los países industrializados, el CO₂ sigue teniendo el mayor aporte (80,4 % en 1990 y 83,2 % en el 2005). Las emisiones de CO₂ crecieron en 0,6 % mientras que las de CH₄ y N₂O disminuyeron en 18,5 y 20,8 % respectivamente. Las emisiones de todos los sectores, excepto la energía, disminuyeron entre 1990 y el 2005. Las emisiones de la energía se incrementaron en 0,5 %, y dentro de estas resaltan las

derivadas del transporte que crecieron en 18,1% desde 1990 al 2005.

Emisiones y remociones de gases de efecto invernadero en Cuba

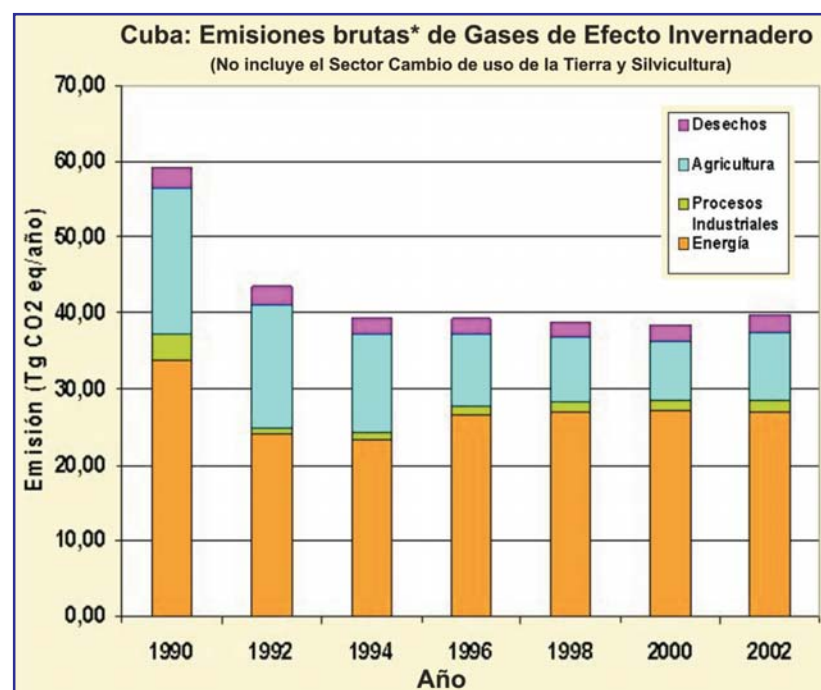
En Cuba se acomete, desde hace años, la vigilancia sistemática de las emisiones y remociones de los GEI. Esta actividad la desarrolla el Equipo Técnico de Gases de Efecto Invernadero coordinado por el Instituto de Meteorología, y con la participación de especialistas de diferentes instituciones y organismos del país.

Las emisiones brutas de GEI (en las que no se toman en cuenta las emisiones y remociones derivadas del cambio de uso de la tierra y la silvicultura) tuvieron una aguda disminución en Cuba a partir de 1990, cuando alcanzó su valor mínimo alrededor de 1993, aunque no en todos los sectores este mínimo ocurrió en el mismo año. A partir de 1993 estas se han incrementado ligeramente en algunas categorías de fuentes y estabilizado, o disminuido, en otras (López et al., 2007) (Fig. 14). En el 2002 las emisiones brutas de GEI eran 33,1 % inferior a las de 1990.

En ese año, el sector Energía aportaba 68,2 % de las emisiones, seguido de la Agricultura (22,4 %); Desechos 5,7 % y Procesos Industriales 3,7 %. Predominaban las emisiones de dióxido de carbono (65,6 % de las emisiones), seguidas por el metano (19,1 %) y el óxido nitroso (15,3 %). En este comportamiento de las

emisiones influyen diferentes factores, entre estos: las dificultades económicas experimentadas por el país a partir de 1990, la introducción de importantes medidas de ahorro, en especial en relación con la energía, y el impulso dado al desarrollo de sectores económicos (y actividades) relativamente menos emisores, entre estos el turismo.

Por otra parte, el sector forestal del país ha sido un sumidero neto de dióxido de carbono (CO₂) en todos estos años. Las remociones de la atmósfera, de ese GEI, por la biomasa aérea de los bosques, se incrementaron en 7,5 % entre 1990 y 2002 en correspondencia con el crecimiento del área boscosa. Este aspecto contribuyó a que las emisiones netas de GEI en el 2002, resultaran 46,1 % menores que en el año base 1990. En las emisiones netas se toman en cuenta las emisiones y remociones del uso y cambio de uso de la tierra y la silvicultura.



Fuente: López et al., 2007.

Fig. 14. Emisiones brutas de GEI en Cuba (Tg CO₂ eq/año).

CAMBIO CLIMÁTICO. IMPACTOS, VULNERABILIDAD Y ADAPTACIÓN

Cambios observados en el clima

En el más reciente Informe de Evaluación Científica del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) se concluye que el calentamiento del sistema climático es *inequívoco*, lo que resulta evidente a partir del incremento promedio observado en las temperaturas mundiales del aire, de los océanos, el generalizado derretimiento de los hielos y el aumento del nivel medio del mar (Fig. 15). Es muy probable que el incremento del aporte de los gases de efecto invernadero al calentamiento global no haya tenido precedentes en más de diez mil años. En el caso del dióxido de carbono, su contribución al calentamiento global (expresada en la capacidad de irradiar energía) aumentó en 20 % entre 1995 y 2005, la cual es la mayor tasa de crecimiento en al menos los últimos 200 años.

Los registros de la temperatura media global de los 100 años comprendidos entre 1906 y 2005 indican un calentamiento de la tierra del orden de 0,74 °C. Once de los últimos 12 años (1995-2006) se ubican entre los más calurosos desde 1850, solamente queda fuera 1996. Los años 1998 y 2005 clasifican como los más calurosos en ese mismo orden. Los días fríos, las

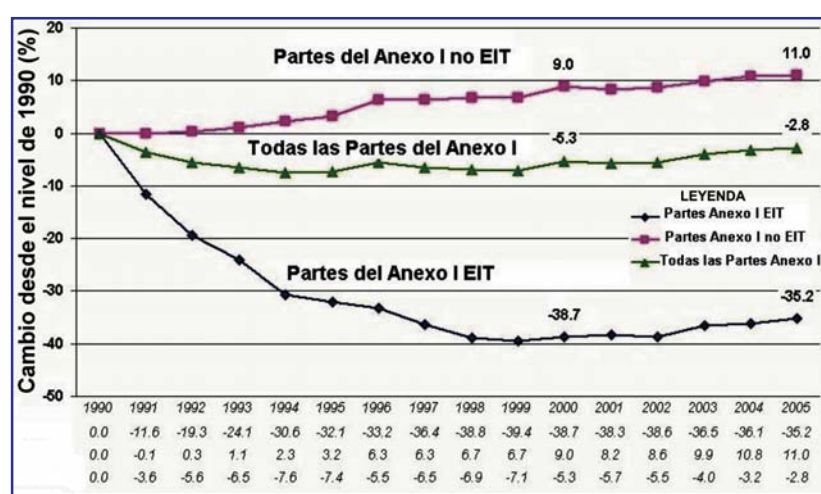
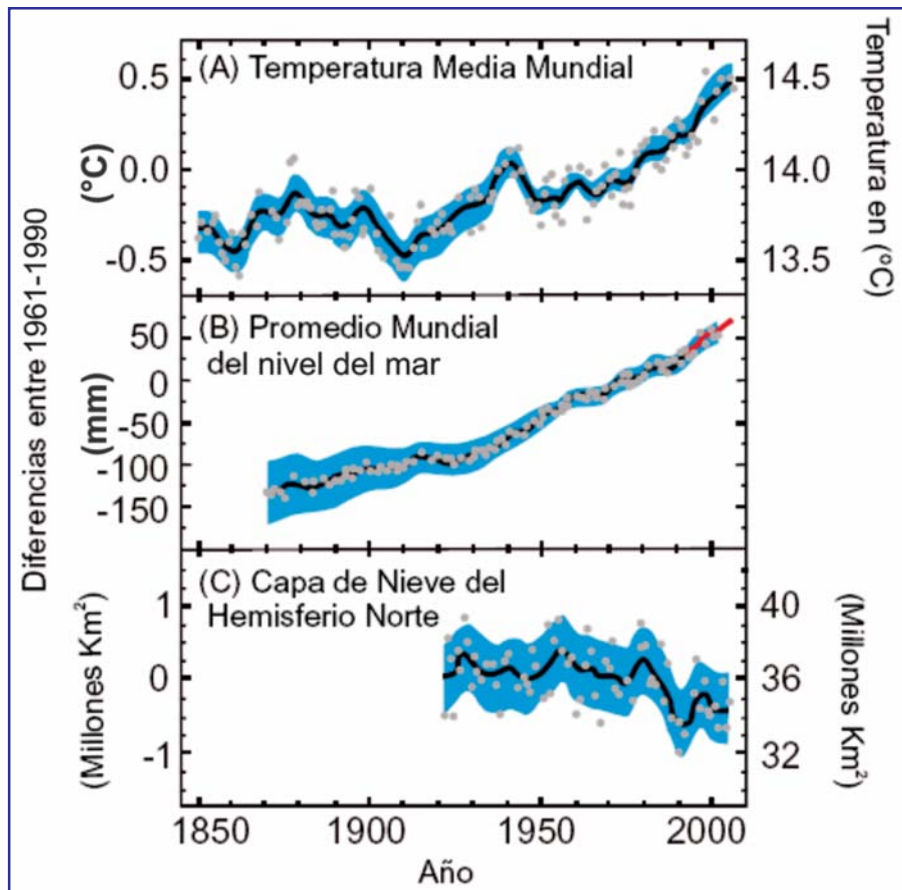


Fig. 13. Cambio, en porcentaje, de las emisiones de gases de invernadero de los países industrializados entre 1990 y el 2005. No se incluyen las emisiones y remociones derivadas del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura (Fuente: UNFCCC, 2007).



Fuente: IPCC, 2007.

Fig. 15. Cambios observados en a) la temperatura media mundial de la superficie terrestre; b) media mundial del aumento del nivel del mar tomada con mareógrafo (azul) y datos de satélite (rojo) y c) las capas de nieve del hemisferio norte de marzo a abril. Todos los cambios son relativos a las medias correspondientes al periodo de 1961 a 1990. Las curvas suavizadas representan los valores medios por decenio, en tanto que los círculos muestran los valores anuales. Las áreas sombreadas son los intervalos de incertidumbre estimados a partir de un análisis integral de las incertidumbres conocidas (a y b) y de las series cronológicas (c).

noches frías y las heladas se han tornado menos frecuentes, en tanto que los días calientes, las noches calurosas y las olas de calor se han tornado más frecuentes. Es muy probable que el incremento de las temperaturas medias a nivel mundial desde mediados del siglo xx se deba al visible aumento de las concentraciones de gases antropógenos de efecto invernadero.

A largo plazo se han observado numerosos cambios en el clima, a escalas continental, regional y de cuencas oceánicas. En el Ártico las temperaturas promedio se incrementaron a una tasa que casi duplica el crecimiento promedio global en los pasados cien años, mientras que desde 1978 los datos del satélite muestran que el promedio anual de la extensión de hielo del mar Ártico se ha reducido en 2,7 % por década, con mayores disminuciones en el verano. En el periodo 1900-2005 se registró un aumento de las precipitaciones en el oriente de Norteamérica y Sudamérica, en el norte de Europa, y en áreas septentrionales y centrales de Asia. La sequía, sin embargo, afectó la zona del Sahel, el Mediterráneo, el sur de África y Asia Meridional. También se han observado sequías más duraderas e intensas en grandes áreas desde 1970, particularmente en zonas tropicales y subtropicales.

Existe evidencia, basada en observaciones, del incremento de la actividad ciclónica intensa en la zona del Atlántico Norte desde alrededor de 1970. Ello se ha correlacionado con el incremento de las temperaturas de la superficie oceánica en las áreas tropicales. En otras zonas también se estima un incremento de la actividad ciclónica intensa, aunque en estos casos existe mayor preocupación en cuanto a la calidad de los datos. No hay una tendencia clara en cuanto al número anual de ciclones tropicales.

Las observaciones realizadas desde 1961 muestran que la temperatura media del océano mundial ha aumentado en profundidades de, al menos, 3 000 m, y que el océano ha estado absorbiendo más de 80 % del calor añadido al sistema climático. Este calentamiento provoca que se expanda el agua de mar, lo cual contribuye a que se eleve su nivel.

De manera consistente con el calentamiento observado, las cubiertas de hielo en Groenlandia y la Antártica, así como los glaciares y las cubiertas de nieve en ambos hemisferios, se han reducido. Tales fenómenos, junto a la expansión térmica de las aguas oceánicas han contribuido al ascenso observado en el nivel del mar promedio global.

Desde 1961 la razón de incremento del nivel del mar fue de 1,8 mm/año, mientras que a partir de 1993 fue prácticamente el doble. Se estima que el incremento total del nivel del mar en el siglo xx es de 0,17 m; y es muy probable que la actividad humana haya contribuido a este.

El ostensible calentamiento generalizado de la atmósfera y los océanos, así como la reducción de la masa de hielo, sirven de sustento a la conclusión de que es en extremo improbable que el cambio climático mundial observado en los últimos 50 años pueda explicarse obviando la consideración de los elementos externos, asociados a la actividad humana (antropogénica); y es muy probable que no se deba únicamente a causas naturales conocidas.

Se puede destacar que los cambios sufridos por el clima en Cuba durante las últimas cuatro

décadas son consistentes en apuntar la existencia de una variación importante en la década de los años 70.

En Cuba, las evidencias indican claramente que el clima se ha hecho más cálido. Desde mediados del pasado siglo la temperatura media anual ha aumentado cerca de 0,6 °C (Fig. 16). La década de los años 90, así como la actual, han sido las más cálidas, se destacan

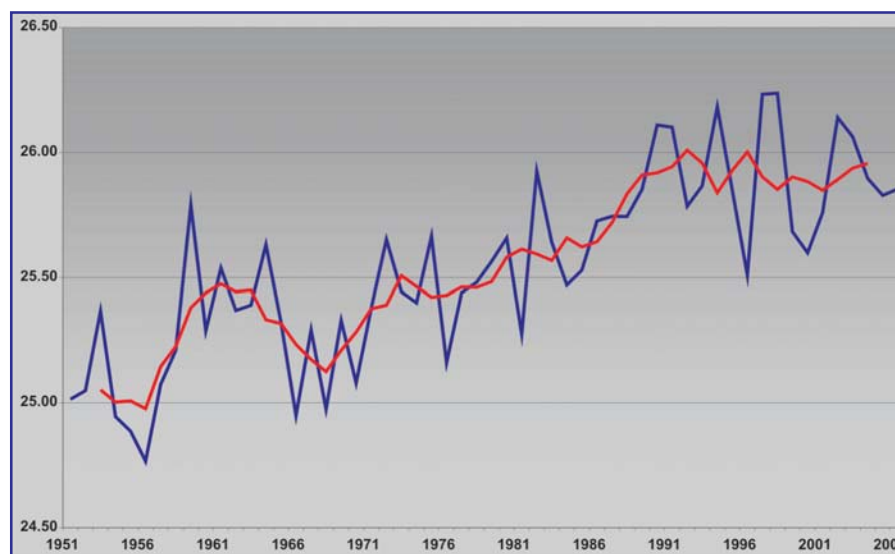


Fig. 16. Temperatura media anual de Cuba entre 1951 y el 2006. Incluye las medias móviles de cinco años de dichos valores.

los años 1997 y 1998 como los de mayor registro en esa serie climática hasta el momento. El incremento observado es debido, fundamentalmente, a una tendencia muy marcada de las temperaturas mínimas, que han sufrido un ascenso de alrededor de 1,4 °C en sus valores medios mensuales (Fig. 17). Las tendencias en las temperaturas máximas no son significativas por lo que, consecuentemente, se ha registrado una disminución de la oscilación térmica media diaria de casi 2,0 °C. En términos generales se está produciendo una expansión del verano y una contracción de la duración del invierno en Cuba.

Otro elemento del clima de Cuba donde se refleja de manera evidente la ocurrencia de variaciones significativas en su comportamiento es el régimen pluviométrico. Es sabido que las estaciones climáticas de Cuba quedan definidas por las peculiaridades del régimen de precipitaciones, de donde se establece la subdivisión del año en dos semestres: lluvioso, que se extiende desde mayo hasta octubre, y poco lluvioso desde noviembre hasta abril.

Aunque las precipitaciones en Cuba no han mostrado variaciones significativas para periodos largos de registros, en las últimas décadas se observó un incremento de los acumulados del periodo poco lluvioso y un cierto decrecimiento en los acumulados del periodo lluvioso. Adicionalmente, la frecuencia de sequías se ha incrementado significativamente desde 1960. La periodicidad y extensión de dichos procesos se han acentuado, especialmente hacia las provincias más orientales, lo que motivó que el Instituto de Meteorología estableciera un sistema de monitoreo de tales procesos, con el fin de alertar a tiempo sobre las tendencias estacionales observadas, y hacer recomendaciones efectivas para el mejor manejo de los recursos hídricos del país. Paradójicamente se ha observado un aumento en la ocurrencia de fenómenos atmosféricos capaces de producir grandes volúmenes de precipitaciones e inundaciones, o sea, se evidencian alteraciones en la distribución espacio-temporal de las precipitaciones, ello evidencia un incremento en la variabilidad del clima en Cuba.

La disminución de las precipitaciones está vinculada a cambios más generales en los patrones de la circulación general de la atmósfera que gobiernan la frecuencia de los fenómenos meteorológicos que afectan el territorio nacional. Los estudios de circulación regional en la región del Mar Caribe han sugerido que la estructura e influencia del Sistema de Altas Presiones de Las Azores-Bermudas sobre la región sufrió cambios a escalas de tiempo multidecadales (varias décadas). Tales cambios han producido una tendencia significativa hacia el incremento en las corrientes zonales medias del este sobre Cuba, favoreciendo la mayor cantidad de días con buen tiempo, despejados y cálidos en nuestra latitud.

Por otra parte, en relación con eventos extremos tales como, tornados y granizos, así como con las lluvias intensas y las sequías antes mencionadas, el clima en Cuba parece que se está haciendo más extremo durante las tres últimas décadas. Los eventos de lluvias intensas de la década de los años 80 fueron los mayores reportados en el siglo xx, mientras que los brotes de tornados y los eventos intensos se han hecho más frecuentes desde 1977.

Entre 1971 y 1995 se produjo una etapa de poca actividad ciclónica sobre Cuba. A partir de 1996 un total de ocho huracanes han afectado al país, lo que determina la existencia de una nueva etapa muy activa, en asociación con el incremento observado en el océano Atlántico. Lo más sobresaliente ha sido la ocurrencia de cuatro huracanes intensos desde el 2001, cifra que no se había registrado en década alguna desde 1791 hasta el presente (Fig. 18), aunque si ha ocurrido con anterioridad en cuatro periodos naturales de 9 o 10 años, como son los casos de 1944-1952 y 1924-1933, para mencionar los dos más recientes como ejemplo. Sin embargo, no se ha detectado la existencia de tendencias a largo plazo en la actividad de huracanes sobre Cuba, teniendo en cuenta una serie muy larga y confiable comprendida entre 1791 y 2007. Debe señalarse la existencia de una

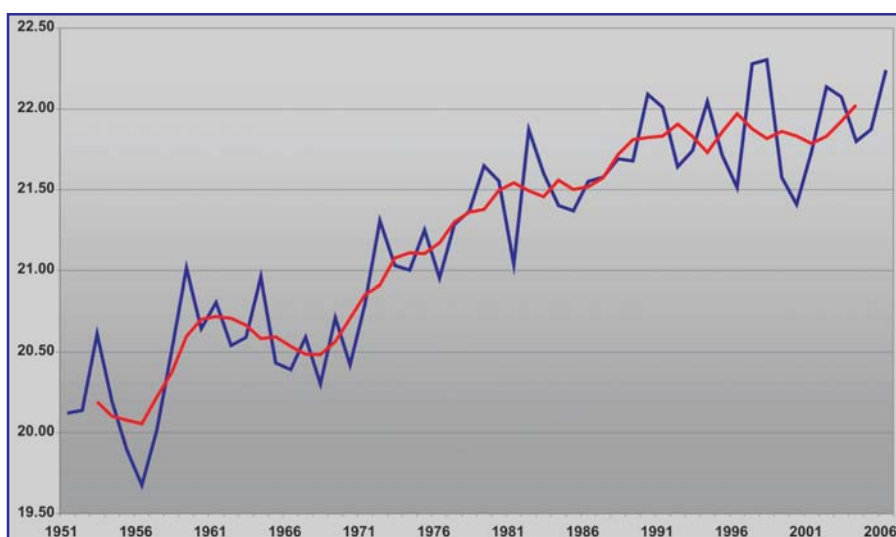


Fig. 17. Temperatura mínima media anual de Cuba entre 1951 y el 2006. Incluye las medias móviles de cinco años de dichos valores.

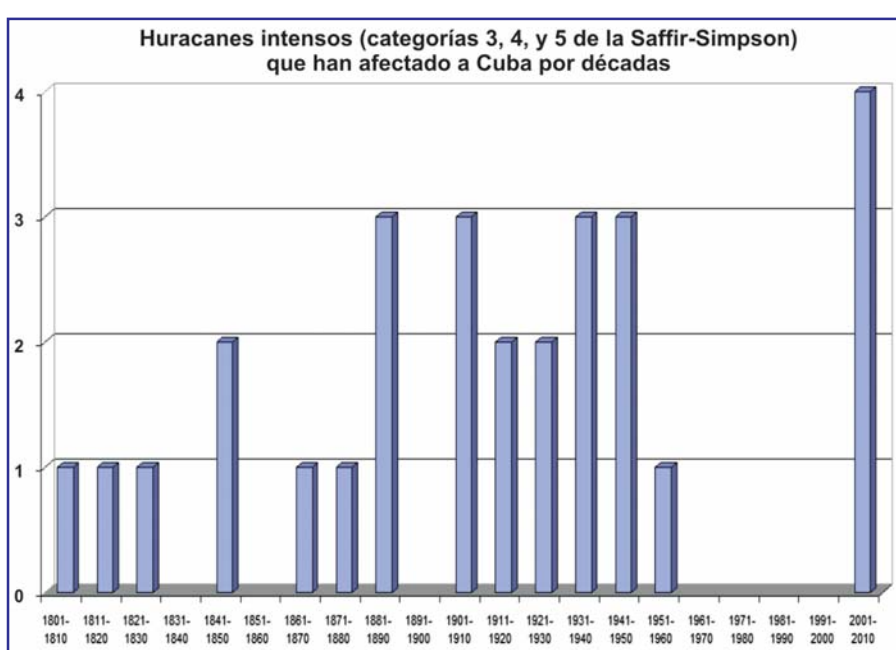


Fig. 18. Número de huracanes intensos que han afectado a Cuba por décadas desde el año 1801.

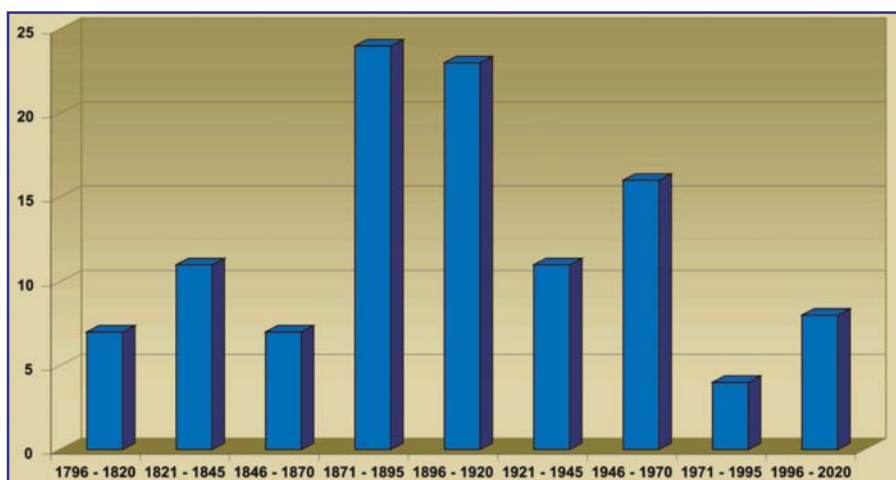


Fig. 19. Número de huracanes que han afectado a Cuba por periodos de 25 años seleccionados.

Tabla 4. Tendencia del nivel medio del mar en cinco localidades del archipiélago cubano, estimada a partir de mediciones directas. En la tabla: TA-NMM-Tasa anual del nivel medio del mar; I-NMM-Incremento del nivel medio del mar que se calcula como el producto de la TA-NMM por la duración del período de observaciones (Tomado de Hernández, 2006)

Estaciones	Latitud	Longitud	Periodo	Duración [años]	TA-NMM [cm/año]	I-NMM [cm]
1	2	3	4	5	6	7
Los Morros	21° 54,0' N	84° 54,4' W	1973-2000	28	0,038	1,064
Siboney	23° 05,6' N	82° 28,2' W	1966-2005	40	0,214	8,560
La Isabela	22° 56,4' N	80° 00,8' W	1973-2005	33	0,069	2,277
Gibara	21° 06,5' N	76° 07,5' W	1976-2005	30	0,175	5,250
Casilda	21° 45,2' N	79° 59,5' W	1972-1995	24	0,005	0,120

gran variabilidad multianual, caracterizada por la sucesión de períodos poco activos y muy activos (Fig. 19).

En el caso del nivel del mar es posible indicar que, a partir de los registros de las estaciones mareográficas existentes en Cuba (Tabla 4), hasta el año 2005 el nivel medio del mar se ha incrementado aunque no de forma homogénea, entre 0,120 y 8,56 cm.

Proyecciones climáticas

¿Qué herramientas se emplean para proyectar el clima futuro?

El impacto de las perturbaciones antropogénicas sobre el sistema climático puede ser proyectado calculando todos los procesos clave que operan en el sistema mediante formulaciones matemáticas, las cuales a su vez se sustentan en principios físicos bien establecidos. Debido a la variedad y complejidad de esos procesos, tales formulaciones sólo pueden ser implementadas en un programa para computadora, referido como modelo climático.

Los modelos climáticos son derivados de las leyes físicas fundamentales (como la ley del movimiento de Newton), que son sujetas a aproximaciones físicas apropiadas para un sistema de gran escala como lo es el sistema climático. Los medios computacionales existentes restringen la resolución espacial en la cual es posible simular los procesos, estos hacen necesaria la estimación de los procesos que no se resuelven explícitamente.

Si todo el conocimiento que existe sobre el sistema climático pudiera ser incorporado completamente, el modelo sería muy complejo para ejecutarlo en cualquiera de las computadoras existentes. Por esta razón, y debido a razones prácticas, se realizan simplificaciones para reducir complejidad y aumentar la eficiencia computacional. Se crea entonces un espectro de modelos con diferente nivel de complejidad y aplicabilidad. En sentido general, el espectro está integrado por:

- **Modelos climáticos tridimensionales océano-atmósfera** (Fig.20): Son los de mayor complejidad, pues integran o acoplan: i) Modelos de circulación general de la atmósfera, ii) Modelos de circulación general del océano, iii) Modelos de hielos marinos, y iv) Modelos de procesos de la superficie terrestre.

Por lo general la resolución espacial de estos modelos es del orden de 200 a 300 km², aunque en años recientes se ha reducido notablemente (cerca de 100 km²).

- **Modelos climáticos simples** (Fig. 21): Modelos simplificados con reducida complejidad, debido a que las dimensiones se reducen o se eliminan. Los resultados de estos modelos se reflejan solamente como medias globales de temperatura en superficie e incremento del nivel del mar.
- **Modelos del sistema terrestre de complejidad intermedia**: Se diseñaron como variante intermedia entre los tridimensionales y los simples. Estos modelos describen muchos de los procesos que están implícitos en los complejos, pero en una forma más simple. Como son desde el punto de vista computacional más eficientes que los complejos, se utilizan para realizar simulaciones de largos períodos. El desarrollo y aplicación de estos modelos es bastante reciente.
- **Modelos climáticos regionales**: En general son similares a los modelos complejos, en lo que se refiere a su estructura interna. Sin embargo, se implementan solamente para una región limitada del planeta (por ejemplo, la cuenca del Caribe y el Golfo de México) con una resolución espacial muy baja que puede ser de 10 a 50 km². Estos modelos no son del todo independientes, pues al ser utilizados deben ser «alimentados» por las salidas de modelos tridimensionales, en forma de condiciones de frontera o contorno.

Aunque los modelos climáticos tridimensionales océano-atmósfera son la mejor herramienta para representar los procesos que ocurren en el sistema climático, las limitantes que imponen los recursos computacionales, restringen su empleo⁸.

¿Cómo se emplean los modelos en la proyección del clima?

La proyección del cambio climático utilizando los modelos climáticos puede ser explicada de manera simple, siguiendo las etapas que se reflejan en la figura 22. La primera etapa, que no se incluye explícitamente dentro de los modelos climáticos, consiste en estimar los posibles perfiles de emisiones futuras de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y otros compuestos. Los perfiles de emisiones de GEI, también denominados escenarios de emisiones, son deducidos con modelos independientes que toman en consideración el crecimiento poblacional, el empleo de la energía, el desarrollo tecnológico, etcétera.

El IPCC desarrolló un conjunto de escenarios de emisiones denominados comúnmente como SRES (por las siglas en inglés, Special Report on Emission Scenarios). Existen cuatro familias denominadas A1, B1, A2 y B2, las cuales agrupan, cada una, un conjunto de escenarios que siguen narrativas comunes (ver el recuadro que aparece en la página 16).

A partir de estos escenarios y empleando modelos de ciclos de vida de los gases en la atmósfera se estiman las concentraciones atmosféricas, es decir, la cantidad de GEI que queda en la atmósfera. Posteriormente, con el empleo de modelos de transferencia radiativa, se utilizan las concentraciones estimadas para determinar el forzamiento o efecto de calentamiento. Finalmente, se estima el efecto del mayor calentamiento sobre el clima.

Es importante mencionar que los mecanismos de retroalimentación complican este simplificado panorama. Por ejemplo, el calentamiento adicional del sistema climático (forzamiento radiativo) para el doble de la concentración de CO₂ sería de unos 3,8 Wm⁻². En términos simples, tal forzamiento produciría un incremento de la temperatura media global del orden de 1,0 °C. Sin embargo, una vez que el cambio se produce y la temperatura aumenta, se inician una serie de procesos a los cuales se les denomina retroalimentaciones.

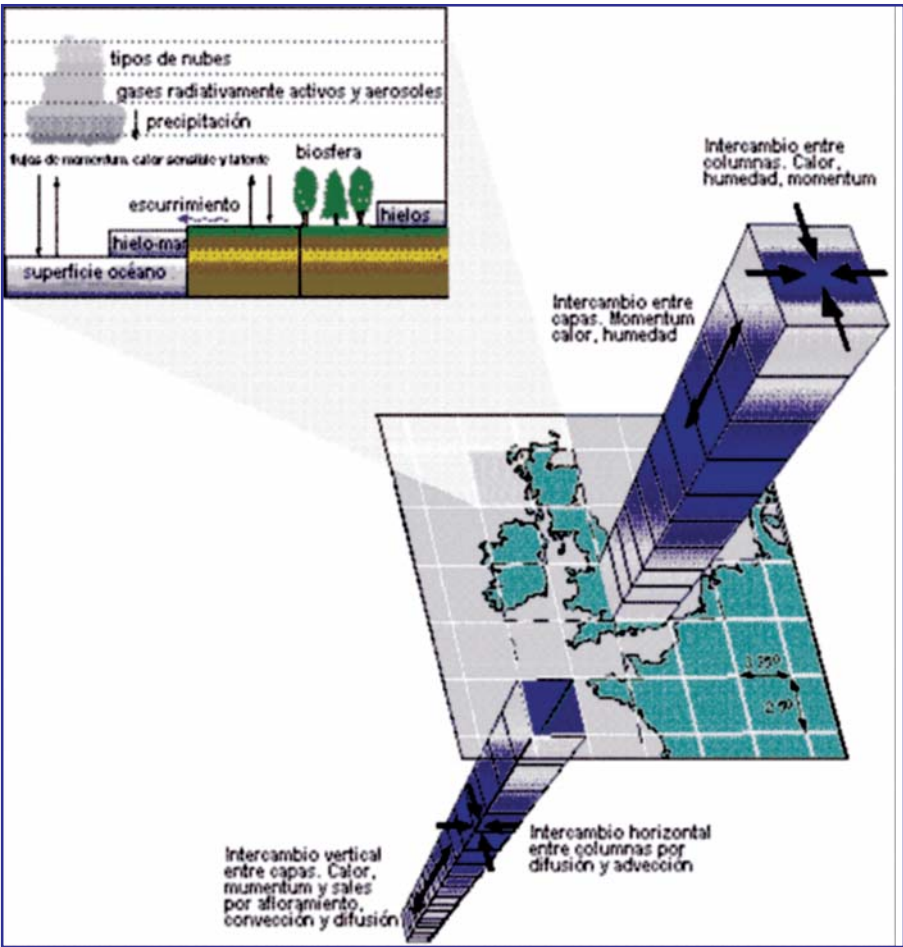


Fig. 20. Representación esquemática de las etapas para la predicción del cambio climático.

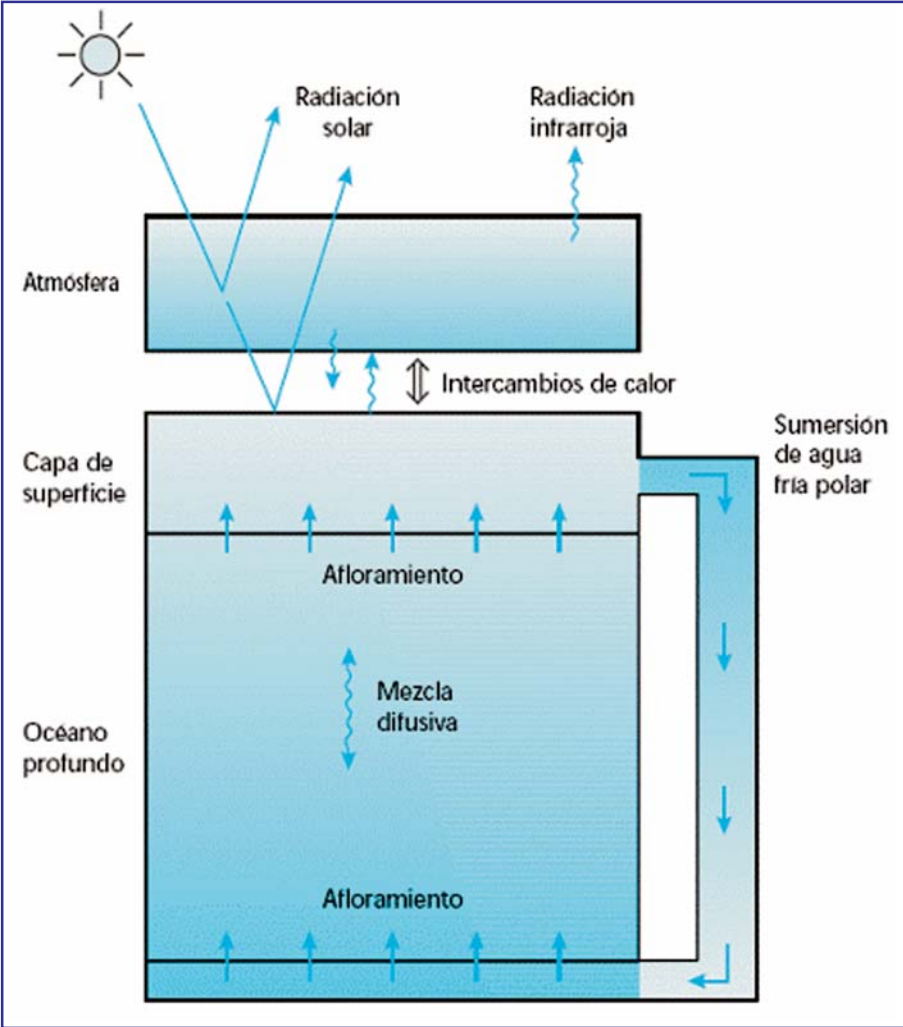


Fig. 21. Representación esquemática de la estructura espacial de un modelo tridimensional océano-atmósfera. Para cada cuadrícula y nivel (en la atmósfera y el océano) el modelo resuelve las ecuaciones físicas mediante las cuales se representan los intercambios (calor, humedad, etc) que suceden en la atmósfera y los océanos.

Por un lado, las retroalimentaciones tienden a reforzar el cambio inicial (retroalimentación positiva) o a debilitar el mismo (retroalimentación negativa). Por ejemplo, el calentamiento de la atmósfera posibilita que esta pueda contener más vapor de agua, y como el vapor de agua es un gas de efecto invernadero muy potente, en-

tonces su mayor concentración incrementa el calentamiento inicial. Por otro lado, un incremento de la concentración de CO_2 aumenta la velocidad de crecimiento de las plantas (efecto de fertilización por incremento de la fotosíntesis) las que a su vez absorben más CO_2 , y actúan entonces como una retroalimentación negativa. La existencia combinada de estas retroalimentaciones debe representarse en los modelos, y como no existe una comprensión completa de estas, entonces se convierte en una de las fuentes de incertidumbres más importantes.

¿Cuáles serán los cambios más significativos en el futuro?

Sobre la base de los escenarios de emisiones mencionados y de los resultados que se obtuvieron del mayor ejercicio multimodelos desarrollado a nivel mundial entre los años 2001 y 2007 (al considerar los resultados de más de 20 modelos climáticos), en el último informe de evaluación científica del IPCC se indica que:

- El calentamiento promedio global de la superficie asociado a una duplicación de las concentraciones de CO_2 es probable que esté en el rango de 2 a 4,5 °C, con un mejor estimado de 3 °C.
- Para las próximas dos décadas se proyecta un calentamiento de alrededor de 0,2° C por década, para el conjunto de escenarios de emisiones considerados en este estudio. Aún

cuando se mantuviesen constantes, a los niveles del año 2000, las concentraciones de todos los GEI y los aerosoles, se esperaría un calentamiento adicional de 0,1 °C por década.

- De continuar el crecimiento de las emisiones de GEI a las tasas actuales o superiores, esto ocasionaría

- un calentamiento adicional e induciría muchos cambios en el sistema climático global durante el siglo xxi , que muy probablemente serían mayores que en el siglo xx .
- De mantenerse las tendencias actuales, el rango del incremento de la temperatura global para la última década del siglo xxi , según los escenarios evaluados por el Informe del IPCC, oscilaría entre 1,1 y 6,4 °C (con un rango de mejores estimados entre 1,8 y 4,0 °C) tomando como referencia el promedio de las últimas dos décadas del siglo xx .
- El rango del incremento del nivel del mar para la última década del siglo xxi , según los escenarios evaluados por el Informe del IPCC, oscilaría entre 0,18 y 0,59 m, tomando como referencia el nivel promedio de las últimas dos décadas del siglo xx .
- El incremento de las concentraciones atmosféricas de CO_2 conducen a un incremento de la acidificación de los océanos.
- Las emisiones antropogénicas pasadas y futuras de CO_2 continuarán contribuyendo al calentamiento global y a la elevación del nivel del mar por más de un milenio, debido a las escalas de tiempo requeridas para remover a ese gas de la atmósfera.

NOTAS

- (1) IPCC: Siglas en inglés del Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
- (2) Albedo: La fracción de la radiación solar incidente sobre un cuerpo, que es reflejada por este. Una medida del poder reflexivo de una superficie (a menudo expresado en porcentaje).
- (3) Un teragramo (Tg) equivale a un millón de toneladas.
- (4) ppm: Número de moléculas del gas de invernadero por millón (10^6) de moléculas de aire seco (no se considera el vapor de agua). Corresponde a la unidad SI $\mu\text{mol/mol}$.
- (5) ppb: Número de moléculas del gas de invernadero por billón (10^9) moléculas de aire seco (no se considera el vapor de agua). Corresponde a la unidad SI nmol/mol .
- (6) ppt: Número de moléculas del gas de invernadero por trillón (10^{12}) moléculas de aire seco (no se considera el vapor de agua). Corresponde a la unidad SI pmol/mol .
- (7) El término *agregadas* implica que las emisiones de GEI son calculadas como una suma ponderada de CO_2 , CH_4 , N_2O , HFC, PFC y SF6. Esta suma se realiza utilizando los potenciales de calentamiento global acordados por la Convención Marco de Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (1 para CO_2 , 21 para CH_4 , 310 para N_2O , y valores específicos para los HFC y PFC individuales y el SF6).
- (8) Empleando una supercomputadora NEC SX-6, el modelo del Centro Hadley de Inglaterra, por ejemplo, realiza la simulación del clima para un período de 250 años en un plazo de aproximadamente tres meses. El código de programa de ese modelo puede tener más de mil líneas y los resultados generados actualmente significan unos 300 terabytes (millón de millones de bytes) de datos, los cuales deben ser sometidos posteriormente a los análisis que deriven en resultados concretos.

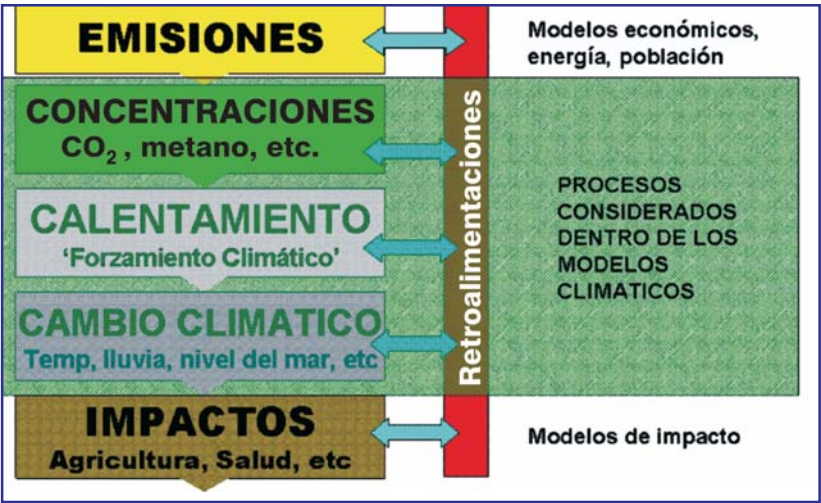


Fig. 22. Representación esquemática de las etapas para la predicción del cambio climático.

Escenarios de emisiones del Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE)

A1. La familia de escenarios y línea evolutiva A1 describe un mundo futuro de crecimiento económico muy rápido; la población mundial alcanza su nivel más alto a mitad del siglo y disminuye posteriormente, se produce una rápida introducción de nuevas tecnologías más eficaces. La familia de escenarios A1 se divide en tres grupos que describen las distintas direcciones del cambio tecnológico en el sistema energético, a saber: fuentes de energía intensivas de origen fósil, de origen no fósil o un equilibrio entre todas las fuentes.

A2. La familia de escenarios y línea evolutiva A2 describe un mundo muy heterogéneo. Los perfiles de fertilidad en las distintas regiones tienden a converger muy lentamente, lo cual acarrea un aumento continuo y constante de la población. El desarrollo económico tiene una orientación principalmente regional y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos.

B1. La familia de escenarios y línea evolutiva B1 describe un mundo convergente, con la misma población mundial, que alcan-

za su nivel más alto a mediados del siglo para disminuir posteriormente, como en la línea evolutiva A1 pero con cambios rápidos en las estructuras económicas hacia una economía de la información y de los servicios, con reducciones en el consumo de materiales e introducción de tecnologías limpias y de recursos eficaces. En esta línea evolutiva se hace hincapié en las soluciones mundiales a la sostenibilidad económica, social y ambiental, lo que comprende una mejora de la equidad, sin iniciativas climáticas adicionales.

B2. La familia de escenarios y línea evolutiva B2 describe un mundo en el que se hace hincapié en las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Se trata de un mundo cuya población mundial crece continuamente, a un ritmo menor al de la línea evolutiva A2, con niveles medios de desarrollo económico y cambios tecnológicos menos rápidos y más variados que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque el escenario también está orientado hacia la protección ambiental y la equidad social, se centra en los niveles local y regional.

BIBLIOGRAFÍA

- Centella A., L. Naranjo, L. Paz, P. Cárdenas, B. Lapinel, M. Ballester y otros (1997): «Variaciones y cambios del clima en Cuba» [inédito], Informe Técnico, Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología, La Habana, 58 pp.
- Guerman V. J. y S. P. Levikov (1988): *Análisis probabilístico y modelación de las variaciones del nivel del mar*, Edit. Hidrometeoizdat, Moscú, 229 pp.
- Grupo Nacional de Cambio Climático (2001): *Primera Comunicación Nacional de la República de Cuba a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático* (A. Centella, J. Llanes, L. Paz, C. López y M. Limia, eds.), Instituto de Meteorología - CUBAENERGIA, La Habana.
- Hernández M. (2006): Tendencia del nivel medio del mar en el archipiélago cubano. *Proceedings del Seminario sobre Desarrollo Sostenible del Medio Costero en el Caribe y Taller sobre Vulnerabilidad de las Zonas Costeras en el Caribe*, ISP JAE - HR Wallingford - UNISA. 28/X - 1/XII, 9 pp.
- Hofman, D. J., (2007): The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>
- Instituto de Meteorología (2002): *Tabloide Elementos de Meteorología y Climatología*, Editorial Academia, La Habana, 32 pp.
- IOC (1985): Manual on sea level measurement and interpretation. Vol. I: Basic Procedures. *Manuals and Guides*, no.14, 83 pp.
- _____ (1994): Manual on sea level measurement and interpretation. Vol. II: Emerging Technologies. *Manuals and Guides*, no.14, 72 pp.
- _____ (1997): Global Sea Level Observing System (GLOSS). Implementation Plan-1997. *Intergovernmental Oceanographic Commission technical series*, no. 50, UNESCO.
- IPCC (2007): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Boshc, R. Dave, LA. Meyer, eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 24 pp. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-spm-sp.pdf>
- IPCC (2007b): Summary for Policymakers (Resumen para decisores). En: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.
- Limia, M.; R. Vega; R. Pérez y J. Durán (2000): «Climatología de los ciclones tropicales que han afectado a Cuba 1799-1998» [inédito], Informe Científico de Resultado no. 4 del Proyecto 01301094, Instituto de Meteorología, 36 pp.
- López, C. (2006): *Introducción a la Gestión de la Calidad del Aire*, Instituto de Meteorología, DESOFT, La Habana, 703 pp.
- López, C.; P. V. Fernández; R. Manso, A. Valdés, A. León, A. V. Guevara y otros (2007): *Gases de Efecto Invernadero. Emisiones y Remociones. Cuba 1990-2002*. ETGEI- Instituto de Meteorología, La Habana, junio de 2007, 29 pp.
- Organización Meteorológica Mundial (1966): Vocabulario Meteorológico Internacional. En *OMM*, no. 182, TP 91, Ginebra, 398 pp.
- Jansá, J. M. (1974): *Curso de climatología*, Instituto Cubano del Libro, La Habana, 445 pp.
- Solomon et al. (2007): Resumen Técnico. En *Cambios Climáticos: Base Física de la ciencia. Aportes del Grupo de Trabajo I al cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambios Climáticos*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos, 77 pp. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/climate-changes-2007-ar4-sp.htm>
- UNFCCC (2007): National greenhouse gas inventory data for the period 1990-2005. FCCC/SB1/2007/30, Bonn, 24 October 2007, 28 pp.
- WMO (2003): Proyecto GURME de la Vigilancia Atmosférica Global. <http://www.wmo.int/web/arep/gaw/urban.html>
- _____ (2007): Greenhouse Gas Bulletin No. 3. World Meteorological Organization. Global Atmosphere Watch. Geneva, 23 November 2007, 4 pp.