

UNIVERSIDAD PARA TODOS

Curso Energía y Cambio Climático

PARTE 1

ISBN 978-959-270-177-9



9 789592 701779

ÍNDICE

Parte 1

ENERGÍA Y POTENCIA / 2

- Energía. Formas de energía / 2
- Fuentes y portadores de energía / 3
- Transformación, conservación y degradación de la energía / 3
- Potencia. Unidades de energía y potencia / 4

USO DE LA ENERGÍA A LO LARGO DE LA HISTORIA / 4

- Esfera de la energía / 4
- Ciclo de la energía / 4
- Tratamiento integral de la energía / 5
- Primera transición energética / 5
- Segunda transición energética / 5

IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DE LA ENERGÍA / 6

- Proceso de contaminación atmosférica / 6
- Alcance de la contaminación / 6
- Clasificación de los contaminantes / 6
- Impactos de la contaminación atmosférica en la salud humana / 6
- Otros impactos ambientales / 7

TIEMPO Y CLIMA / 7

- Concepto de clima / 7
- Clima y sistema climático / 8
- Características de los componentes del sistema climático / 8

VARIACIONES Y CAMBIOS DEL CLIMA / 8

- Variabilidad natural del clima / 8
- Cambios climáticos / 9
- Variabilidad del clima y eventos climáticos extremos / 9
- Variaciones observadas en el clima de Cuba / 9

EFFECTO INVERNADERO. GASES DE EFFECTO INVERNADERO / 10

- Efecto invernadero natural / 10
- Efecto invernadero incrementado por las actividades humanas / 10
- Gases trazas de importancia para el clima / 10
- Nivel y tendencias de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera / 10
- Emissiones de gases de efecto invernadero / 10

CALENTAMIENTO GLOBAL Y CAMBIO CLIMÁTICO / 11

- Cambios observados en el clima / 11
- Proyecciones climáticas / 12
- Impactos del cambio climático / 12

ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN. COMPONENTES BÁSICOS DE LAS RESPUESTAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO / 14

- Adaptación ante el cambio climático. Concepto y necesidad de la adaptación / 14
- Tipos de adaptación / 14
- Capacidad de adaptación / 14
- Mitigación del cambio climático. Concepto y necesidad de la mitigación / 14

CAMBIO CLIMÁTICO, ECONOMÍA Y SOCIEDAD / 15

COORDINADORES DEL CURSO

Lic. Mario Alberto Arrastía Avila
Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA).
Lic. Ricardo Bérriz Valle
Centro de Desarrollo Local (CEDEL).

COORDINADOR DEL TABLOIDE

Lic. Mario Alberto Arrastía Avila
Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA).

AUTORES

Lic. Mario Alberto Arrastía Avila, CUBAENERGÍA.
Lic. Julio Torres Martínez, Observatorio Cubano de Ciencia y Tecnología.
DrC. Luis Raúl Paz Castro, Centro del Clima Instituto de Meteorología (INSMET).
MSc. Alejandro González García, CUBAENERGÍA.
DrC. Iván Relova Delgado, CUBAENERGÍA.
Lic. Ricardo Bérriz Valle, Centro de Desarrollo Local (CEDEL).
DrC. Ramón Pichs Madruga, Centro de Investigaciones de la Economía Mundial (CIEM).
MSc. Idelmis Tamara González García, Centro del Clima Instituto de Meteorología (INSMET).

DrC. Ramón Pérez Suárez, Centro del Clima Instituto de Meteorología (INSMET).
MSc. Leonor Turtós Carbonell, CUBAENERGÍA.
MSc. Elieza Meneses Ruiz, CUBAENERGÍA.
DrC. José Altshuler Gutwert.
Lic. Avelino Suárez (IES).
DrC. Carlos Manuel López Cabrera.
Lic. Abel Centella Artola (INSMET).

COLABORADORES

Ing. Marta Alicia Contreras Izquierdo, CUBAENERGÍA.
DrC. Ing. Sergio Corp Linares, CUBAENERGÍA.
Ing. Daniel López Aldama, CUBAENERGÍA.
Lic. Barbarita Valdés Valdés, CUBAENERGÍA.

INSTITUCIÓN COORDINADORA

Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA), perteneciente a la Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada, Ministerio de Ciencia, tecnología y Medio Ambiente.

ORGANIZACIONES PARTICIPANTES

Centro Desarrollo Local (CEDEL).
Observatorio Cubano de Ciencia y Tecnología (OCCyT-ACC).
Dirección de Medio Ambiente del CITMA (DMA-CITMA).
Instituto de Meteorología (INSMET).

Dirección de Uso Racional de la Energía de la Unión Eléctrica (DURE-UNE).
Agencia de Medio Ambiente (AMA).
Centro de Investigaciones de la Economía Mundial (CIEM).
Sociedad Cubana por la Promoción de las Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental CUBASOLAR.

GRUPO DE EDICIÓN EDITORIAL ACADEMIA

Edición y corrección editorial: Lic. Dulce María García Medina
Diseño y tratamiento de imágenes: Marlene Sardiña Prado

ISBN: 978-959-270-177-9 (Parte 1)
ISBN: 978-959-270-176-2 (Obra completa)

2010, "Aniversario 51 del Triunfo de la Revolución" ACADEMIA



ENERGÍA Y POTENCIA

Energía. Formas de energía

El origen de todos los cambios o modificaciones que ocurren a nuestro alrededor, sean por causas naturales o provocados por nosotros, está asociado a un término usado frecuentemente: energía. La movilidad y el empleo de la electricidad, desempeñan un papel vital en la sociedad moderna. Sin ellas sería imposible mantener el entramado socioeconómico alcanzado hasta hoy. A mayor desarrollo, más necesidad de movilidad y dependencia de equipos eléctricos. Ello conlleva mayor uso de energía.

Para la ciencia, la energía desempeña un papel medular en la comprensión de los fenómenos naturales, por su carácter integrador y multidisciplinario. Cuando se produce una modificación, cambian las propiedades de los cuerpos o sistemas. La causa de estos cambios son las interacciones entre los cuerpos o sistemas, cualquiera que sea su naturaleza.

El vocablo energía tiene su origen en las palabras griegas *en*, que significa contenido y *ergon*, trabajo¹. De la unión de ambas palabras surgió el término energía, que significa «trabajo contenido en los cuerpos». En numerosos libros de Física, se dice que la energía es la «capacidad para realizar trabajo»², lo cual es correcto, pero es una idea limitada a los fenómenos mecánicos. Podemos enriquecer esta idea diciendo que: Energía es una medida cuantitativa del movimiento de la materia y caracteriza la capacidad de los sistemas para cambiar sus propiedades o las propiedades de otros sistemas, se produzcan los cambios mediante la realización de trabajo, el calentamiento o la radiación.

A veces la energía se pone en juego para producir cambios en las propiedades de los cuerpos y sus sistemas, que podemos calificar de positivos o favorables, y están dirigidos a cubrir los servicios energéticos y otras veces, para producir cambios negativos o desfavorables, sean o no causados por el propio ser humano. El cambio climático de origen antropogénico es un cambio negativo inducido por el hombre y se relaciona con la emisión deliberada de gases de efecto invernadero (GEI) por la quema de los combustibles fósiles.

La energía se manifiesta en dos formas principales que son la energía cinética y la energía de los campos de fuerzas, donde se incluye la energía potencial y la energía radiante. Cuando un cuerpo se mueve con cierta velocidad respecto a otro, puede cambiar o modificar su estado o el de otros cuerpos. Por eso decimos que un cuerpo en movimiento posee energía y, a esta se le denomina energía cinética. Los cuerpos poseen energía cinética al moverse en línea recta, describir trayectorias curvas, o vibrar. El término energía cinética no solo se refiere al movimiento de los cuerpos como un todo, sino además, al movimiento de sus átomos y moléculas.

El término energía potencial³ describe la energía de un cuerpo debido a su posición relativa respecto a otros cuerpos en un campo de fuerzas, como por ejemplo

el campo gravitatorio o el electrostático. Por eso nos referimos a la energía potencial electrostática cuando estamos en presencia del campo inherente a partículas eléctricamente cargadas que se hallan en reposo relativo; a la energía potencial gravitatoria cuando hablamos de la energía asociada al campo gravitatorio. Es costumbre referirse a la energía potencial como «energía almacenada», pues cuando un cuerpo posee energía potencial su capacidad para producir cambios está latente.

La energía potencial aparece en los sistemas cuando unas partes ejercen fuerzas sobre otras, de un valor que depende de la configuración o posición relativa entre estas partes. La variación de la energía potencial de un sistema de cuerpos sólo depende de sus configuraciones inicial y final, es independiente del camino seguido para llevar a los cuerpos integrantes del sistema hasta una configuración o posición determinada. El valor de la energía potencial es arbitrario y depende de la elección del nivel de referencia.

La energía potencial pertenece a los sistemas y no a los cuerpos individuales. Es incorrecto hablar de la energía potencial de una pelota situada a cierta altura sobre el suelo, y lo riguroso es referirse a la energía del sistema tierra-pelota y al cálculo de las variaciones de la energía potencial en este sistema. La energía potencial elástica se relaciona con los cambios de posición inherentes a la deformación de los cuerpos, como por ejemplo en el sistema formado por un cuerpo y un resorte. Por otro lado, se denomina energía potencial química a la energía que se pone en juego durante las interacciones químicas. De estas interacciones son portadores los átomos, moléculas, iones y radicales. A pesar de sus aparentes diferencias, tanto la energía potencial elástica como la energía potencial química tienen su origen en las interacciones electromagnéticas que ocurren a escala microscópica. Por eso, cuando hablamos de la energía almacenada en las cadenas de hidrocarburos de los combustibles fósiles, nos referimos a su energía potencial química, que al final es energía electromagnética.

La energía mecánica no es una nueva forma de energía, sino la suma de las energías potencial y cinética de los cuerpos que integran un sistema.

Los átomos y moléculas que conforman la estructura interna de los cuerpos se hayan en constante movimiento e interacción. Se denomina energía interna de los cuerpos a la suma de las energías cinética y potencial de sus partículas constituyentes.

La tercera forma básica en que se manifiesta la energía es la radiante. Ejemplos de ello están la energía de la radiación solar, gracias a la cual se sostiene la vida en nuestro planeta, la energía de la radiación infrarroja que emana de un bombillo incandescente, o la radiación electromagnética emitida por la antena de una emisora de televisión o de radio.

Es importante decir que el calor no es una forma de energía, como se pensaba hace unos doscientos años atrás, sino un mecanismo o vía para transferir energía. La energía que un cuerpo tiene, debido a su capacidad calorífica específica y a su temperatura, es energía térmica y no se debe usar para esto el término calor.

Fuentes y portadores de energía

Cuando nos referimos a la energía solar, la eólica, la nuclear, la eléctrica, la biológica, etc., no estamos en presencia de otras formas de energía, sino de los elementos a partir de los cuales se dispone de energía útil. Por ejemplo, cuando empleamos el término energía eólica nos referimos al nombre del portador de energía, el viento, que en última instancia se presenta en forma de energía cinética. Por eso es correcto decir que tanto la energía eólica como la eléctrica o la bioenergía son fuentes de energía.

Cuando un sistema, al interactuar con otro, entrega parte de su energía a través del calentamiento, la radiación o la realización de trabajo, se dice que está actuando como una fuente de energía.

Las fuentes de energía se clasifican de acuerdo con su sitio de origen o por sus características físicas. De acuerdo con su origen están las que se originan en las profundidades o en la corteza terrestre, como por ejemplo la energía geotérmica o los minerales radiactivos y las que se originan fuera de la Tierra: gravitacional (debido a la interacción de la Luna y el Sol con nuestro planeta) y flujo solar, que a la vez se subdivide en radiante (directa y almacenada tanto en la corteza como fotosintéticamente en la biomasa primaria); inducido o indirecto (eólica, oleajes, corrientes oceánicas, hidroenergía); almacenado geológicamente en forma de combustibles fósiles.

De acuerdo con sus características físicas, las fuentes de energía se clasifican en permanentes, también denominadas renovables, o temporales, conocidas como no renovables.

Las fuentes energéticas primarias no renovables son aquellas de las que existen cantidades limitadas, se conozcan o no. Ejemplos de ellas son los combustibles fósiles y los minerales radiactivos. Por otra parte, las fuentes renovables de energía son aquellas, cuya disponibilidad se repite en el tiempo según períodos fijos o variables y en cantidades no necesariamente iguales. Sobre la energía solar, Robert Mayer (1814-1876), médico alemán descubridor de la ley de conservación de la energía expresó: «El Sol, tal como lo entiende el hombre, es un manantial inagotable de fuerza física. La corriente de esta fuerza, que se derrama también por nuestra tierra, es el resorte constantemente tenso que mantiene en movimiento el mecanismo de todas las actividades que tienen lugar en nuestro planeta (...) El mundo vegetal constituye el depósito en el que se fijan y acumulan para su utilización los raudos rayos solares del estío, fuentes de bienes económicos a los que se halla indisolublemente ligada la existencia física del género humano; todo aquel que contempla tanta riqueza, no puede menos que experimentar un vivo sentimiento de admiración».

El portador de energía, también conocido como «vector energético», es la sustancia o dispositivo que se usa para convertir la energía de forma controlada y así realizar trabajo, calentar u operar procesos químicos o físicos. Ejemplos de portadores o vectores energéticos son el hidrógeno, los capacitores, las baterías eléctricas, el aire presurizado, el agua contenida, el carbón mineral, los resortes, la radiación solar y el viento. Los portadores también son renovables como el viento o la biomasa forestal, o agotables como los minerales radiactivos o el petróleo.

El hidrógeno podría sustituir al petróleo como vector energético en el futuro, pues es limpio y renovable cuando se obtiene por electrólisis del agua empleando energía solar. El recurso energético es el mismo portador de energía que ha adquirido un valor comercial en el mercado.

Transformación, conservación y degradación de la energía

La mayor parte de los portadores primarios de energía no se utilizan directamente en la forma en que se encuentran en la naturaleza. Por esta razón se deben transformar en «productos energéticos» que son los que los usuarios encuentran en el mercado energético: compañía del gas, estaciones de abastecimiento de combustible o compañía eléctrica.

Gracias a máquinas y dispositivos más o menos complejos, el ser humano aprovecha las fuentes intermedias de energía, como la electricidad, para satisfacer sus necesidades. Cada una de estas necesidades implica «extraer» energía de algún cuerpo para transmitirla a otro, de modo que se obtenga el efecto útil o los cambios que se deseen en cada caso.

Está acuñado por su uso, hablar de producción, consumo y ahorro de energía. Sin embargo, estos términos no son rigurosamente correctos. Cuando hablamos de producir, consumir o ahorrar energía eléctrica, hablamos, de la transformación de la energía de unas formas a otras y de la transmisión de unos cuerpos a

otros, ya sea en una mayor o menor cuantía. En el caso de la energía, los procesos de transformación y transmisión están sujetos al principio de transformación y conservación de la energía.

La energía o capacidad para producir cambios en las propiedades de los cuerpos o sistemas de cuerpos, no se crea ni desaparece, pasa de un cuerpo o sistema a otro, de una de sus formas de existencia a otra.

En todas las interacciones y procesos la energía se transforma y al mismo tiempo se conserva, independientemente de los sistemas que participen y de la cantidad o el tipo de energía intercambiada. Cuando decimos que producimos, transportamos o consumimos energía, lo que en realidad hacemos es transmitirla de unos cuerpos a otros y transformarla de unas formas en otras, para obtener un determinado efecto útil. Asimismo, cuando consumimos energía no estamos desapareciendo o destruyendo energía, sino transformándola y transmitiéndola. Por ejemplo, una licuadora consume energía de la corriente eléctrica y este consumo no es más que la transformación de la energía eléctrica que llega a este equipo en energía cinética de las partículas del producto que se desea licuar.

Según Mayer, «el calor que desprende el cuerpo humano surge como resultado de la combustión del oxígeno en la sangre». El dióxido de carbono resultante de la combustión es conducido nuevamente por la sangre hacia los pulmones, lo que provoca que esta cambie su tonalidad rojo vivo por un rojo oscuro. Mayer llegó a la conclusión, que en un clima cálido el cuerpo humano necesita generar menos calor que en uno frío, por lo que la combustión del oxígeno es menos intensa, se produce menos dióxido de carbono y la sangre casi no se oscurece.

Mayer determinó el equivalente térmico del trabajo antes que el inglés James Prescott Joule, pero publicó sus resultados tardíamente y no se le reconoce ese mérito. Sobre los aportes de Mayer a la ciencia, Federico Engels expresó: «La constancia cuantitativa del movimiento fue formulada ya por Descartes, y además casi con las mismas palabras que ahora..., en cambio, la mutación de forma del movimiento no se descubrió hasta 1842, y esto, y no la ley de la constancia cuantitativa, es lo nuevo»⁴.

¿Por qué preocuparnos en ahorrar y hacer un uso eficiente de la energía si de todas maneras la energía se conserva? La respuesta a esta pregunta se puede enfocar desde tres puntos de vista. El primero tiene que ver con el cuidado del entorno. La producción de electricidad a partir de combustibles fósiles, trae consigo graves consecuencias para la salud humana y para la preservación de los diferentes ecosistemas a escala planetaria. El segundo se relaciona con la preservación de los recursos limitados con que cuenta el planeta. La transformación de la energía, independientemente que su origen sea renovable o no, requiere de cuantiosos recursos para poder llevarse a cabo. Utilizar menos energía no sólo significa economizar el portador energético, sobre todo si este es no renovable, sino que, además, significa reducir el monto de los recursos necesarios para hacer funcionar los sistemas de transformación y transmisión de la energía. Por último, muy relacionado con los términos producción y consumo, nos encontramos con la degradación de la energía. La energía del movimiento desordenado de las moléculas del aire y de otros cuerpos (energía térmica), no se puede aprovechar, y no es energía útil para producir cambios. Por ello se dice que la energía se ha degradado, ha perdido su calidad, o sea, su utilidad para producir cambios.

No toda la energía «extraída» de los combustibles se transforma en energía útil. Inevitablemente una parte de esta energía se transforma en energía térmica y no la podemos recuperar para producir otros efectos útiles. Al consumir la energía eléctrica esta no se destruye, no desaparece, pero sí «destruimos» su capacidad para producir cambios. Por ello todos debemos contribuir al empleo más racional y eficiente de la electricidad.

Potencia. Unidades de energía y potencia.

Al igual que la palabra energía, la palabra potencia se usa con mucha frecuencia en nuestra vida cotidiana. Potencia es la magnitud física mediante la cual se expresa la rapidez con la que se producen cambios o se llevan a cabo transformaciones de energía, es decir, la potencia expresa el ritmo al que se transfiere o se transforma la energía. La unidad en que se expresa la potencia en el Sistema Internacional de Unidades es el watt (W), en honor a James Watt, inventor e ingeniero mecánico escocés.

Al hablar de centrales termoeléctricas (CTE), es importante conocer la potencia instalada, que nos dice la cantidad de energía que se puede transformar en energía de la corriente eléctrica en un tiempo dado. Las CTE poseen suficiente potencia instalada como para satisfacer las necesidades de una ciudad o zona. La producción de electricidad depende de la demanda de los consumidores. A mayor demanda, mayor cantidad de combustible se deberá quemar para generar la energía requerida y así satisfacer la demanda. Para lograrlo, en el horario pico entran en funcionamiento la mayor cantidad de unidades de generación, poniéndose en tensión el sistema. Diferentes equipos electrodomésticos tienen distintos valores de potencia eléctrica, o sea, tienen ritmos distintos de transformación de la energía eléctrica que toman de la red en energía útil para realizar las funciones para las que se diseñaron (Ver Tabla).

Tabla. Valores típicos de potencia

Equipos	Potencia
Grupo electrógeno Hyundai	2,5 MW
CTE Antonio Guiteras	330 MW
Panel fotovoltaico	165 W
Hidroeléctrica Hanabanilla	43 MW
Parque Eólico Gibara 1	5,1 MW
DVD	14 W
Calculadora electrónica	4 mW
Horno de microondas	1200 W
Videocasetera en standby	6 W

Es una práctica emplear el kilowatt-hora para expresar la energía de la corriente eléctrica que usamos, pues el joule es tres millones seiscientos mil veces más pequeño ($1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$) y es muy engorroso de manejar. Por ejemplo, si deseamos expresar en joule el consumo promedio de cada hogar cubano durante el año 2008, obtendríamos la cifra astronómica de quinientos veinticuatro millones doscientos mil joule ($524\,200\,000 \text{ J}$). La Empresa Eléctrica no nos cobra por la potencia de los equipos electrodomésticos que tenemos en nuestras casas, nos cobra por la «energía utilizada». Esta queda registrada en el contador eléctrico y podemos calcularla multiplicando la potencia de los electrodomésticos que usamos por el tiempo que estos han estado funcionando. Por ejemplo, si usamos una olla arrocera (500 W) durante 1 hora, empleamos una cantidad de energía eléctrica igual a 500 Wh, o sea 0,5 kWh.

Así, el watt y el kilowatt son unidades de potencia, mientras que el watt-hora y el kilowatt-hora son unidades de energía al igual que el joule. Se usan también otras unidades de energía como la caloría, la tonelada equivalente de carbón y la tonelada equivalente de petróleo. De igual manera se emplean comúnmente otros múltiplos del watt-hora como el megawatt-hora (MWh), que equivale a mil kilowatt-hora y el gigawatt-hora (GWh) que equivale a un millón de kilowatt-hora.

USO DE LA ENERGÍA A LO LARGO DE LA HISTORIA

Durante cientos de miles de años, el hombre (Homo sapiens) —al igual que algunos de los homínidos inmediatamente anteriores a él— utilizó fundamentalmente dos fuentes de energía: su propia musculatura y la leña

para hacer fuego. Miles de años después comenzó a aprovechar el viento y la energía muscular de los animales que había domesticado, y a comienzos de nuestra era, comenzó a utilizar las corrientes de agua como fuentes de energía. Pero no empezó a explotar en gran escala los combustibles fósiles hasta la Revolución Industrial.

Esfera de la energía

La energía no constituye un sector económico, aunque su tratamiento exige estudiar todos los sectores, porque ellos, de una u otra forma, demandan energía para su funcionamiento, ya sea productivo o de prestación de servicios; pero también la población demanda energía para satisfacer sus necesidades de iluminación, cocción de alimentos, climatización, refrigeración, transporte, entretenimiento, educación, salud, deportes y actividades culturales, etc. Por eso la energía se debe considerar como una esfera de gran interés para la sociedad, que exige un tratamiento diferenciado y calificado, por sus cuantiosos gastos y sus efectos para todas las actividades humanas, ya que el desarrollo socioeconómico depende de la satisfacción adecuada de dicha demanda (aunque ésta también se vincula estrechamente con las características del desarrollo y se puede reducir de manera importante si se toman las medidas adecuadas en cuanto a la educación, los hábitos y estilos de vida).

Además, en los últimos tiempos, cada vez es más necesario priorizar la atención del proceso para satisfacer la demanda energética, por sus profundos efectos sobre la sostenibilidad del desarrollo socioeconómico, e incluso por sus implicaciones para la supervivencia de la humanidad, debido a que el sistema energético actual basado en el petróleo, no sólo es insostenible, sino que amenaza a la propia especie, porque la contaminación producida por el empleo derrochador de los combustibles fósiles ha puesto en peligro a la humanidad, debido al crecimiento acelerado de las concentraciones atmosféricas de los GEI emitidos cuando se utilizan dichos combustibles.

Ciclo de la energía

La energía es un catalizador del desarrollo socioeconómico. La figura 1, muestra aspectos importantes de la esfera energética como:

- comienza con los portadores de energía y termina con los desechos, que incluyen los GEI, la energía degradada y otros contaminantes;
- el vínculo orgánico energía-ambiente (el medio ambiente suministra los portadores primarios o naturales de energía y también recibe sus desechos);
- los servicios energéticos (iluminación, transporte, calefacción, refrigeración, climatización, cocción de alimentos, etc.) constituyen el objetivo central del ciclo, porque satisfacen necesidades de toda la vida individual y social;
- también muestra la estrecha relación entre la energía y el desarrollo socioeconómico, a través del valor agregado que aportan estos servicios.

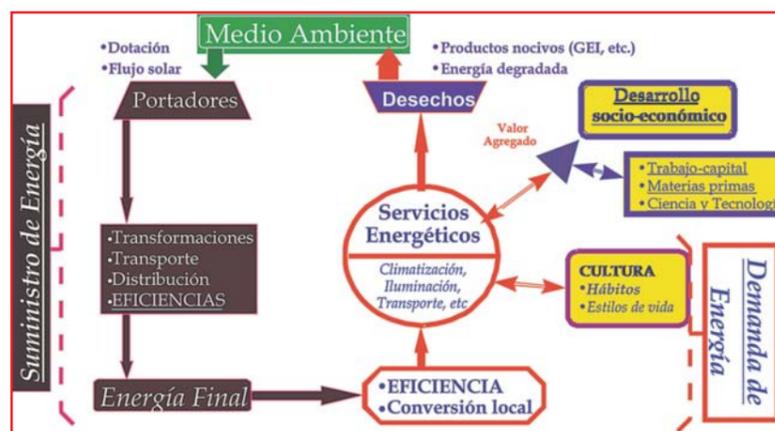


Fig. 1. El ciclo de la energía.

El consumo de los portadores energéticos permite elevar el nivel de vida en la sociedad poniendo a su disposición un conjunto de comodidades, ahorrando tiempo y facilitando la realización de tareas engorrosas, peligrosas, tediosas, que exigen esfuerzos extraordinarios, así como otras ventajas y beneficios.

Es cierto que para disfrutar de un determinado nivel de vida es necesaria una cierta demanda de energía, pero se ha comprobado que a menudo la demanda se puede satisfacer con mayor rapidez y menores gastos, elevando la eficiencia con que se usa la energía y ahorrando portadores, es decir, con medidas «del lado de la demanda», en lugar de aumentar el consumo de portadores, como propone el enfoque tradicional.

La gestión de la demanda de energía resulta una de las variables cruciales para el desarrollo de la sociedad humana, debido a una mayor conciencia del carácter finito de los combustibles fósiles, que constituyen cerca del 80% de las fuentes comerciales de energía primaria utilizadas por la humanidad, a pesar de la contaminación atmosférica producida cuando se queman⁵, porque emiten grandes cantidades de GEI, responsables del calentamiento global y el cambio climático inducido por el hombre (Figura 2).

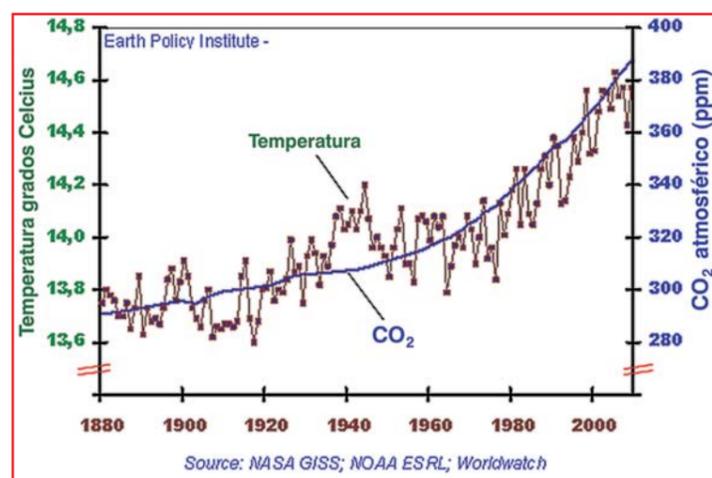


Fig. 2. Temperatura mundial promedio y concentración de CO₂ (1880-2009).

Esta gestión conlleva acciones para el ahorro, el aumento de la eficiencia y otras medidas, incluida la modernización de los dispositivos para el uso final de la energía, cuya influencia sobre la demanda se ha incrementado considerablemente, ya que estos dispositivos se cuentan por miles de millones, o más y los pequeños ahorros en cada uno de ellos, tienen efectos importantes en la reducción de la demanda.

Aunque, la sustitución de combustibles fósiles con fuentes renovables de energía no es una medida «del lado de la demanda», posee grandes ventajas sobre todo por la reducción de los costos de producción, porque se evitan las emisiones de GEI y también, porque promueve una energética sostenible.

Resulta contradictorio que, si bien los países industrializados demostraron durante el último tercio del siglo XX la importancia de elevar la eficiencia en el empleo de las fuentes de energía y la caracterizaron como una fuente más —la más barata y de aplicación más rápida, indudablemente—, capaz de reducir en forma notable la demanda de energía primaria para

prestar los servicios energéticos buscados, el mercado provocó el continuo incremento del consumo, preferenciando el de los combustibles fósiles gracias a sus «bajos» precios y, por tanto, aumentó el efecto invernadero hasta niveles que hoy hacen peligrar la supervivencia de la humanidad.

La figura 1 representa dos ideas básicas del ciclo:

1. El concepto de servicio energético, que es la vía para convertir la energía en un factor concreto del desarrollo socioeconómico mediante el valor agregado, donde la energía se incorpora a este desarrollo.

2. El concepto de eficiencia como un costo de oportunidad ocasionado por los procesos de transformación, transportación, almacenamiento y distribución de los portadores, tanto durante el suministro de estos, como en la etapa de conversión local (es decir, cuando se transforman en servicios energéticos). En lugar de «pérdida» (como antiguamente eran llamados) ese costo responde por la transformación del portador para facilitar su empleo, o por su transportación y almacenamiento para emplearlo donde y cuando se necesite.

Entre otros elementos importantes identificables en el ciclo se destacan también dos grandes grupos de portadores naturales (o primarios) de energía:

- La dotación, constituida por la hulla, los hidrocarburos y los minerales radiactivos, como un producto finito de las etapas de formación terrestre que no se repetirán.
- El flujo solar como algo «infinito» para la escala humana, pues el Sol seguirá brillando durante varios miles de millones de años más y la energía que emite seguirá llegándonos durante ese tiempo, la aprovechemos o no.

La existencia del flujo solar constituye una importante diferencia tanto cualitativa como cuantitativa, entre el planeta como sistema aislado y la Tierra como parte del sistema solar, con las decisivas consecuencias que ello trae para la vida del hombre a la luz del Segundo Principio de la Termodinámica o Ley de la Entropía, ya que dicho flujo aporta diariamente nuevas posibilidades para reducir su valor siempre creciente.

En este contexto, se puede definir a la energética sustentable como un sistema capaz de satisfacer la demanda de servicios energéticos básicos de toda la humanidad mediante la administración de la demanda y la utilización de las fuentes renovables de energía, mientras el Sol alumbró nuestro sistema planetario.

Tratamiento integral de la energía

La necesidad de un tratamiento integral de la energía proviene de la posibilidad real de sustituir unos portadores energéticos por otros, así como la de reducir la demanda por vías culturales, conductuales o mediante la modernización de los dispositivos de consumo final.

Existen consideraciones que argumentan la inclusión de la energía, con un tratamiento integral, en el grupo de esferas priorizadas del desarrollo socioeconómico, cuyas tecnologías asociadas son capaces de modificar la sociedad en que vivimos, si el hombre las utiliza de manera consciente.

- Con el objetivo de obtener los servicios energéticos que necesita, el hombre ha desarrollado portadores artificiales de energía (la electricidad alterna y el hidrógeno), así como también tecnologías cada vez más eficientes que se asocian al portador para el que fueron diseñadas y determinan los costos generales de toda la actividad humana en sus distintas manifestaciones socioeconómicas.
- Después de dos transiciones energéticas que llevaron a cabo los países industrializados, el petróleo se convirtió en energético de referencia y rige la economía mundial, que depende de sus precios y la competitividad de sus tecnologías asociadas para casi todas las actividades humanas.

Sin embargo, un grupo de factores incide hoy sobre esta hegemonía del petróleo y crea la necesidad objetiva de modificar esa situación, efectuando una nueva transición hacia las fuentes renovables de energía (FRE) derivadas del flujo solar. Entre ellos se destacan:

1. La espiral inflacionaria de marcado carácter especulativo que afecta los precios del petróleo, sobre todo desde el año 2005, manteniéndolos en unos 70 USD/barril o más.
2. El consumo de petróleo y de otros combustibles fósiles, contamina el entorno e impulsa un cambio climático acelerado inducido por el hombre, que amenaza su propia supervivencia.

3. El carácter no renovable del petróleo y de los combustibles fósiles en general permite prever su extinción inexorable en una perspectiva más o menos lejana, lo que se agrava por el fenómeno llamado «pico» productivo del petróleo, previsto por el geólogo norteamericano Martin King Hubbert desde la segunda mitad del siglo xx, que recientemente ha recibido confirmación con alta probabilidad para antes del 2030 o incluso, del 2020. El modelo propuesto por Hubbert en 1956 fija el momento en que se ha consumido aproximadamente la mitad de las existencias, a partir del cual la producción decrecerá en forma inevitable y será imposible satisfacer la demanda, si esta continúa aumentando.

Estas circunstancias implican costos adicionales para la sociedad, que se debieron incluir desde siempre en los precios del petróleo, pero los monopolios transnacionales los mantuvieron artificialmente «bajos» durante muchos años para demorar el acceso de las FRE al «mercado» energético y todavía no forman parte de dichos precios, a pesar de su escalada reciente.

Otros factores que avalan la necesidad de iniciar la nueva transición son los geográficos (los hidrocarburos están concentrados sólo en ciertas regiones del planeta), los económicos (los precios del petróleo no incluyen sus costos reales, y cuentan con jugosos subsidios), los sociales (casi un tercio de la humanidad no tiene acceso a la electricidad viéndose obligada a emplear leña y otras fuentes tradicionales con tecnologías ineficientes que agreden al entorno y a la salud de las personas que las utilizan) y políticos (nuevas guerras de conquista para garantizar el acceso y control del petróleo y el gas natural que confirman la necesidad de sustituir los combustibles fósiles^o como fuentes dominantes de energía).

Primera transición energética

El hombre aprendió a utilizar las fuentes de energía para obtener determinados servicios energéticos que le permiten realizar con mayor facilidad o menor esfuerzo tareas engorrosas, peligrosas, repetitivas, que demandan mucho tiempo o esfuerzo físico y que están asociadas con el aumento del bienestar o el nivel de vida de los seres humanos.

Aunque, existen registros históricos sobre el empleo del carbón mineral en China durante los siglos xi y xii con fines siderúrgicos, hasta fines del siglo xviii los portadores energéticos utilizados mayoritariamente por la humanidad eran fuentes renovables, sobre todo la leña, el carbón vegetal, el viento y la energía hidráulica, derivadas todas del flujo solar en mayor o menor medida.

A partir de la primera revolución industrial, proceso enmarcado de manera convencional entre 1760 y 1830, la tecnología se desarrolló con ritmos inéditos al aparecer invenciones como la máquina de vapor, los telares, el ferrocarril y los navíos propulsados a vapor. Como una de las vías para impulsar ese proceso, se comenzó a emplear la hulla o carbón mineral, que sustituyó en cierta medida a la leña y al carbón vegetal, protagonizando la primera transición energética e iniciando desde ese momento el consumo de la dotación finita del planeta en materia de recursos energéticos.

Segunda transición energética

Casi un siglo después, en el último tercio del siglo xix, se inició una segunda revolución industrial, vinculada con la aparición de nuevos e importantes avances tecnológicos como los motores de combustión interna, las redes eléctricas, la aviación y otros vehículos automotores, cuyo desarrollo está íntimamente relacionado con el descubrimiento y empleo de los hidrocarburos, también extraídos de la dotación del planeta. Así, el petróleo sustituyó a la hulla como fuente preferida y protagonizó la segunda transición energética, asociada con la introducción de estas tecnologías; la segunda transición dio lugar a nuevas situaciones en la esfera de la energía como:

- La aparición de un mercado mundial (dominado por un puñado de grandes transnacionales que lo manipulan para maximizar sus ganancias), que convirtió al petróleo en el energético de referencia.
 - La utilización extendida de tecnologías que utilizan petróleo, manufacturadas y comercializadas por las propias transnacionales que controlan este mercado mundial.
 - La entronización de un empleo suntuario e irracional de los hidrocarburos, el cual condujo en poco más de un siglo al consumo de casi la mitad de las existencias mundiales de hidrocarburos, disfrutada por una porción minoritaria de la humanidad, sin tener en cuenta además los daños causados al entorno durante su empleo.

¿Una nueva transición energética?

Si las dos primeras transiciones energéticas estuvieron asociadas con otras tantas revoluciones industriales, parecería lógico suponer que a la actual revolución del conocimiento y de las tecnologías de la información y de las comunicaciones le correspondería vincularse con una nueva transición energética, a fin de perpetuar el desarrollo socioeconómico de la especie humana, más allá de la duración del petróleo y la hulla.

Pero además, el carácter finito de los combustibles fósiles unido a sus efectos contaminantes, aspectos claramente evidentes a fines de los años 60 del siglo xx, indujo la búsqueda de posibles alternativas para alcanzar un desarrollo sustentable. Así, a finales de la década del 70 surgió el planteamiento de la necesidad de una nueva transición para alcanzar una energética sustentable, sistema capaz de satisfacer la demanda de servicios energéticos de la humanidad una vez extinguida la dotación del planeta, lo cual ocurrirá de forma inexorable en algún momento futuro. Se propuso en ese contexto a la electricidad y el hidrógeno como energéticos de referencia (IIASA, 1981) para esa nueva etapa del desarrollo socioeconómico de la humanidad; posteriormente, se ha confirmado la factibilidad técnico-económica de tal transición en estudios recientes.

La nueva transición energética será por supuesto un proceso a largo plazo, durante el cual los portadores de origen fósil y las fuentes renovables de energía deben coexistir, aunque en proporciones cambiantes. Ese tránsito exige necesariamente mayor eficiencia y medidas del lado de la demanda, de manera que las fuentes renovables puedan progresivamente ir satisfaciendo, a partir del flujo solar, proporciones crecientes de la demanda de servicios energéticos.

La nueva transición se encuentra realmente en sus comienzos, aunque la biomasa aprovechada con tecnologías modernas y «maduras» se utiliza ahora en una proporción relativamente alta para generar electricidad y calor (a menudo mediante instalaciones de cogeneración) en muchos países industrializados donde resulta competitiva con los hidrocarburos, mientras que las electricidades eólica y fotovoltaica alcanzaron altos ritmos anuales de introducción en los sistemas energéticos durante los últimos años, ante situaciones concretas en las que ya también resultan competitivas en relación con el petróleo. Estos dos últimos casos cuentan además con el apoyo de grandes transnacionales petroleras que, adquirieron las capacidades industriales requeridas para su fabricación a gran escala y aspiran a obtener grandes volúmenes de tecnologías asociadas, lo que contribuirá también a reducir cada vez más los costos correspondientes, todavía bastante altos; al mismo tiempo, sus fabricantes ejercen un importante dominio sobre los mercados y controlan las tecnologías para disfrutar ventajas casi monopolísticas.

La energética sustentable no dependerá de un portador «preferido», como lo ha sido hasta ahora el petróleo, sino de las fuentes renovables disponibles en cada país o región, combinadas con mejoras crecientes de la eficiencia en las cadenas tecnológicas particulares y en la economía como un todo, también conju-

gadas con la modernización oportuna de los activos a fin de aprovechar más adecuadamente estas mejoras y reducir de manera continua la demanda de fuentes de energía, al mismo tiempo que se aumentan los servicios energéticos prestados con ellas para satisfacer las necesidades de un mayor número de personas.

IMPACTO AMBIENTAL DEL USO DE LA ENERGÍA

De todas las formas de actividad humana quizás la más contaminante y degradante del medio ambiente es la relativa al manejo de los recursos energéticos fósiles, es decir su prospección, extracción, producción, transporte y consumo. La mayor parte de la energía que se emplea en el mundo proviene de las llamadas «energías fósiles», que constituyen alrededor del 80% del consumo de energía primaria.

El uso de la vía energética «dura» se sustenta en un sistema de valores que se justifican a sí mismos es decir: dominación, competencia, explotación, desarrollo desigual, violencia, etc., todos tendientes a maximizar la ganancia. Este esquema de consumo energético mundial se sustenta en un paradigma que domina la civilización contemporánea que considera al ecosistema (planetario) inagotable, y que tiene una capacidad ilimitada para reciclar de manera natural los desechos de la sociedad, que el crecimiento económico a expensas de la naturaleza no tiene límites y permite expandir infinitamente el consumo humano generando la felicidad⁷.

Una de las características esenciales de los impactos provocados por el sistema energético contemporáneo (SEC) es la interacción de fenómenos de diversos tipos que ocasionan un entramado de problemas ambientales, económicos, sociales, políticos, etc. Es necesario verlos en su integralidad desde la perspectiva de la relación medio ambiente-desarrollo.

La combustión de carbón, petróleo y gasolina es el origen de buena parte de los contaminantes atmosféricos que producen distintos efectos sobre el medio ambiente.

Proceso de contaminación atmosférica

Las actividades e instalaciones energéticas son responsables de gran parte de la contaminación atmosférica que existe en el planeta. La producción de electricidad, sobre todo la que se realiza empleando combustibles fósiles, puede provocar una contaminación atmosférica significativa a escala local, regional y global, tanto por la emisión directa de contaminantes primarios, como por los contaminantes secundarios que se forman en la propia atmósfera a partir de los primarios.

La contaminación atmosférica se define como la alteración de la composición química media de la atmósfera a niveles de concentración de los contaminantes que producen efectos adversos sobre la salud humana y otros elementos del medio ambiente.

Los lugares desde donde emanan los contaminantes son llamados fuentes. Existen fuentes naturales como la respiración animal y vegetal, la putrefacción y la actividad volcánica y fuentes provenientes de las actividades humanas o fuentes antrópicas. Los sumideros son los lugares donde los contaminantes desaparecen. Incluyen suelo, vegetación, estructuras y cuerpos de agua, especialmente los océanos.

Los contaminantes son transportados, dispersados o transformados física o químicamente en la atmósfera y finalmente alcanzan los receptores. Un receptor es alguien o algo que resulta afectado adversamente por estar expuesto a un aire contaminado. Algunos de los contaminantes se pueden eliminar de la atmósfera mediante procesos naturales.

Alcance de la contaminación

En dependencia de la permanencia de los gases emitidos en la atmósfera, esta puede ser local, regional o global. Los gases que tienen larga permanencia, como los gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O y otros),

tienen efectos globales. Los óxidos de azufre y nitrógeno primarios tienen efecto local pero normalmente se transforman en aerosoles de sulfatos y nitratos que pueden permanecer en la atmósfera por varios días y trasladarse hasta pocos miles de kilómetros, por lo que ocasionan también daños regionales o continentales. Finalmente otras emisiones a la atmósfera como los hidrocarburos pesados y partículas solo pueden provocar daños locales.

La importancia de la evaluación de la contaminación atmosférica en el dominio regional se ha evidenciado en los últimos años por cuanto numerosos estudios realizados han comprobado que los principales impactos sobre la salud humana de muchos de los contaminantes primarios, como por ejemplo los óxidos de azufre y nitrógeno, no son los provocados por ellos directamente, sino por los aerosoles de sulfato y nitrato en que se transforman durante su dispersión a escala regional.

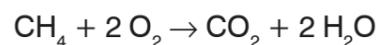
Clasificación de los contaminantes

Se denominan a veces contaminantes clásicos a aquellos asociados a la contaminación atmosférica urbana: CO, NO_x, SO_x, Pb, O₃ y partículas en suspensión o material particulado en suspensión.

Las sustancias que se emiten directamente a la atmósfera se denominan contaminantes primarios, mientras que otras formadas por diversos procesos físicos y reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera se denominan contaminantes secundarios.

Contaminantes primarios

La mayoría de los contaminantes ingresan a la atmósfera como resultado de los procesos de combustión y, de hecho, los gases y partículas emitidos durante los procesos de combustión han constituido el interés principal de los esfuerzos de legislación y control ambiental atmosférico. En su expresión más sencilla podemos imaginar la combustión completa de un hidrocarburo puro como el metano (CH₄):



Los productos de combustión son dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O); ninguno de ellos se ha considerado como contaminante atmosférico asociado al deterioro de la calidad del aire ambiente. Sin embargo la acumulación del CO₂ en la atmósfera está asociada al cambio climático.

La mayoría de los combustibles no son puros, contienen además de los elementos básicos, otros como nitrógeno, azufre (S), plomo (Pb) y una cantidad de material no combustible llamado cenizas. Al quemarse un combustible de estas características emitirá más óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, partículas y cenizas.

Contaminantes secundarios

Ozono

Las reacciones anteriores muestran la generación de los principales contaminantes primarios. Con respecto a los secundarios, es importante considerar la formación de ozono (O₃) troposférico y otros componentes de la niebla fotoquímica y de aerosoles de sulfatos y nitratos.

En contraste con el ozono estratosférico, gas necesario que protege la vida en la tierra de la radiación ultravioleta, el ozono en la troposfera se conoce por sus efectos adversos en la salud humana y en cultivos y materiales. Este contaminante se forma mediante reacciones fotoquímicas a partir de los óxidos de nitrógeno en presencia de los compuestos orgánicos volátiles como los hidrocarburos emitidos y la radiación solar.

Aerosoles de sulfato y nitratos

Los óxidos de azufre y nitrógeno primarios se transforman en aerosoles de sulfato y nitratos. Las emisiones primarias de óxidos de azufre y nitrógeno, amoníaco y partículas, en presencia de otros contaminantes atmosféricos, interaccionan químicamente para formar NH₄NO₃, H₂SO₄ y (NH₄)₂SO₄, sufriendo a continuación procesos de deposición seca y húmeda, esta última conocida como lluvias ácidas.

Impactos de la contaminación atmosférica en la salud humana

El deterioro de la calidad del aire provoca impactos en la salud humana (por ejemplo, incremento de la incidencia de ataques de asma, reducción en la expectativa de vida, etc.), los cultivos agrícolas, los materiales de construcción y los ecosistemas.

Los contaminantes atmosféricos son capaces de producir efectos negativos en la salud humana, los que de ningún modo son excluyentes entre sí; estos pueden ser agudos, y más frecuentemente, crónicos como:

- Disminución del flujo de aire en las vías respiratorias a nivel subclínico en los niños y en la población general^{8,9}.
- Deterioro del rendimiento físico aún en personas sanas¹⁰.
- Irritación de las mucosas oculares y del tracto respiratorio superior.
- Aumento de la frecuencia de síntomas respiratorios altos y bajos.
- Disminución de la resistencia a las infecciones del aparato respiratorio.
- Deterioro de la función pulmonar en los niños y en la población sana, aumento de la frecuencia, duración y severidad de las crisis agudas en pacientes asmáticos, y de angina en pacientes de cardiopatía isquémica.
- Incremento de la prevalencia y los síntomas de las enfermedades respiratorias obstructivas crónicas como la bronquitis crónica y el enfisema pulmonar.
- Aumento de la incidencia de cáncer pulmonar, aún después de ser controlado el hábito de fumar y la exposición ocupacional¹¹.

Comúnmente las relaciones entre ambiente y salud, salvo casos excepcionales de emergencias ambientales agudas por accidentes tecnológicos u otras causas, caracterizadas por la exposición intensa de agentes peligrosos, son complejas y difíciles de evaluar¹².

Existe poco nivel de conocimiento respecto a las consecuencias de la exposición cotidiana durante largos períodos, a concentraciones relativamente bajas de contaminantes. A ello contribuyen múltiples factores como la falta de especificidad y origen multicausal de la mayoría de los efectos que estos agentes pueden ocasionar; el prolongado período de latencia de muchas de estas afecciones; la falta de registros históricos continuos y confiables de monitoreo ambiental; la diversidad de ambientes en que las personas desarrollan sus actividades a diario; la exposición simultánea a otros factores de riesgo, como el tabaquismo, la contaminación del aire interior en las viviendas y en los puestos de trabajo, así como otros determinantes del estado de salud vinculados a las condiciones de vida de origen socioeconómico. El efecto de las migraciones también puede hacer difícil la evaluación retrospectiva de las exposiciones y por tanto la medición de las relaciones dosis respuesta para muchos de los efectos crónicos asociados¹³.

Bajo las condiciones habituales de exposición observadas en la población general, la contaminación atmosférica se comporta como un factor de riesgo de baja intensidad aparente. Sin embargo, debido a su elevada incidencia puede dar lugar a riesgos atribuibles de importante magnitud, que provocan pérdida de calidad de vida, morbilidad aguda y crónica, invalidez y mortalidad prematuras, con el consiguiente costo económico para el paciente, la familia, los servicios de salud y la sociedad en general¹⁴.

En los últimos años diversos estudios han reportado que niveles de exposición ambiental hasta hace poco considerados como inocuos, son capaces de ocasionar efectos adversos sobre la salud de la población general, y en particular de los grupos más susceptibles, como niños pequeños, asmáticos, enfermos crónicos y ancianos¹⁵. La Organización Mundial de la Salud y sus oficinas regionales han establecido valores guía para la gran mayoría de los contaminantes del aire, prioritarios en zonas urbanas, basados en las evi-

dencias más actualizadas disponibles a partir de estudios toxicológicos, clínicos y epidemiológicos¹⁶.

Otros impactos ambientales

Otro efecto de las emisiones de contaminantes a la atmósfera producto de la combustión son las precipitaciones ácidas en forma de lluvia o neblina. Más del 80% del dióxido de azufre, 50% de los óxidos de nitrógeno, y de 30 a 40% de las partículas en suspensión emitidos a la atmósfera proceden de las centrales eléctricas que queman combustibles fósiles, las calderas industriales y las calefacciones. Estos contaminantes son transportados por el viento y las nubes, ocasionando efectos adversos en áreas muy distantes del lugar de la emisión, produciéndose en forma de depósito o de lluvias ácidas.

Según datos de organismos internacionales las lluvias ácidas han aumentado desde 1970 en diez veces. La acidez relativa de muchos lagos y embalses de agua dulce se ha visto tan alterada que han quedado destruidas poblaciones enteras de peces y otras especies. Como consecuencia de las escorrentías y filtraciones estas aguas ácidas van a parar a las cuencas subterráneas contaminándolas, haciéndolas inservibles y dañinas para el consumo humano. Asimismo, las concentraciones de vapores ácidos producen numerosos perjuicios a la salud sobre todos en las áreas urbanas donde sus concentraciones suelen ser mayores. Se ha podido comprobar su relación con numerosas enfermedades de las vías respiratorias y con la irritación de las mucosas. Las lluvias ácidas tienen un notable efecto defoliante y es la causa de la desaparición de extensas zonas boscosas sobre todo en el hemisferio norte. Tiene como agravante que la acidez de suelos es acumulativa y prácticamente no se elimina haciendo virtualmente inservibles los suelos para procesos de reforestación. El impacto que esto produce sobre la biota en general es incalculable. Las emisiones de dióxido de azufre y la subsiguiente formación de ácido sulfúrico son también responsables del ataque sufrido por las calizas y el mármol a grandes distancias. Se ha podido apreciar su efecto corrosivo sobre materiales de construcción, edificios, equipos, industrias, monumentos y joyas arquitectónicas de la antigüedad.

Además, aunque no se ha demostrado una relación directa entre estos impactos en la atmósfera y la existencia del agujero de la capa de ozono, sí se ha comprobado que las condiciones atmosféricas que ellas generan facilitan la acción destructora de otras sustancias destructoras del ozono estratosférico, por lo que se puede afirmar que están estrechamente relacionados con la existencia de condiciones desfavorables para la vida en el planeta.

Uno de los impactos de mayor atención del SEC es la contaminación de los mares y océanos. Las descargas accidentales y a gran escala de petróleo líquido son una causa importante de contaminación de las costas. Los casos más espectaculares de contaminación por crudos suelen estar a cargo de los super tanqueros empleados para transportarlos, pero hay otros muchos barcos que vierten también petróleo, y la explotación de las plataformas petrolíferas marinas supone también una importante aportación de vertidos. Se estima que de cada millón de toneladas de crudo embarcadas se vierte una tonelada. Esto trae como consecuencia daños considerables a la flora y la fauna del mar y los ecosistemas costeros. Todos los años se cuantifican miles de peces, aves y mamíferos muertos por las llamadas «mareas negras» y son incalculables los daños a otras especies de ecosistemas muy sensibles como los arrecifes coralinos y manglares con las consecuentes pérdidas que estos derrames ocasionan a la pesca y al turismo.

La contaminación térmica provocada por las centrales termoeléctricas se evidencia tanto en la elevación de la temperatura que experimenta el agua de mar al utilizarla como refrigerante de estas instalaciones, como en la emisión de gases a temperaturas superiores a la ambiente. Aunque esta contaminación térmica tiene efectos variables en dependencia de la potencia

de la instalación, se ha comprobado el daño que produce sobre el plancton y otros organismos marinos.

TIEMPO Y CLIMA

Cuando en un mismo día se presentan lluvias, sol intenso o temperaturas contrastantes escuchamos a personas profesionales o no, usar indistintamente los términos tiempo y clima erróneamente, porque estos vocablos no tienen igual significado aunque sí puntos en común.

El concepto de tiempo atmosférico, o simplemente del tiempo, se puede definir como el estado físico de la atmósfera en un territorio determinado, caracterizado por combinaciones de los elementos meteorológicos en un momento dado.

En este concepto podemos identificar ideas principales: el tiempo refleja el estado de la atmósfera, por medio de las combinaciones de los elementos climáticos en un momento dado. Esta última idea nos transmite un elemento importante y es que los fenómenos relacionados con este término suceden o se presentan en intervalos de tiempo cortos ya sean días o semanas.

Las precipitaciones propias de las tardes de verano originadas por el calentamiento diurno, eventos lluviosos asociados al paso de ondas tropicales por los mares al sur de Cuba y las bajas temperaturas asociadas a la acción de altas presiones migratorias de origen polar son ejemplos que se relacionan con este concepto.

Según el Vocabulario Meteorológico Internacional (OMM, 1992), elemento climatológico es toda propiedad o condición de la atmósfera que define el estado físico del tiempo o del clima de un lugar determinado, para un momento o período de tiempo dado.

Son elementos climáticos la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, el viento que por su condición de vector tiene dos componentes dirección y fuerza, la precipitación, etc.

La figura 3 muestra la marcha diaria o comportamiento de la temperatura en la estación meteorológica Casablanca. En ella se aprecia una disminución en las primeras horas del día, donde se reporta el valor mínimo cerca de las 7:00 a.m., seguido de un aumento, reportándose el valor máximo al mediodía y luego una disminución en horas de la noche. Este comportamiento se corresponde con la marcha de la radiación solar.

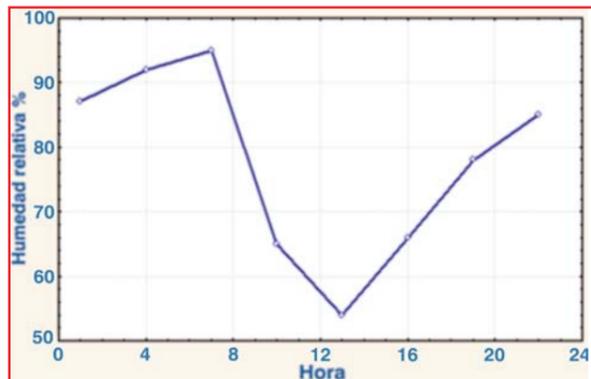


Fig. 3. Marcha diaria de la humedad relativa en la estación meteorológica Casablanca.

En la figura 4 se presenta la marcha diaria o comportamiento de la humedad relativa en la estación meteorológica Casablanca. En ella se observa un valor máximo en el horario de la mañana y un valor mínimo en el medio día, contrario a lo que ocurre con la temperatura.

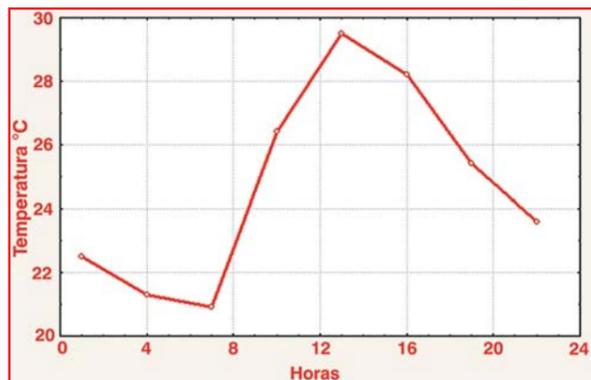


Fig. 4. Marcha diaria de la temperatura del aire, en la estación meteorológica Casablanca.

Cada elemento en un día puede tomar muchos valores, de modo que el tiempo en cada hora del día estará relacionado por la combinación de estos elementos en un lugar determinado.

Concepto de Clima

La palabra clima que proviene del vocablo griego *Klima*, que etimológicamente significa inclinación y se refiere a la oblicuidad con que los rayos solares llegan al suelo, la cual varía según las horas del día, la época del año y la latitud del lugar.

Teniendo en cuenta lo planteado, se pudiera entender que el clima se determina sólo por la intensidad de la radiación solar que se recibe en iguales puntos de latitud. Sin embargo, el significado de la palabra clima es mucho más complejo y se puede enfocar desde diferentes puntos de vista.

Según el Vocabulario Meteorológico Internacional (OMM, 1992), clima es el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evolución del tiempo en una porción determinada del espacio.

En esta definición se presentan tres ideas fundamentales:

1. El clima está compuesto de fluctuaciones.
2. El clima es una expresión del comportamiento de la atmósfera.
3. El clima hace referencia a una zona o porción determinada del espacio.

Es decir, cuando se habla del clima de un lugar, se refiere a un conjunto de condiciones meteorológicas en determinado lugar en un intervalo de tiempo prolongado.

En la Climatología estos intervalos los denominamos normas o normales climatológicas y están compuestos por los valores medios de los elementos del clima en un período de 30 años comenzando con el año 1 y terminando en 0, por ejemplo 1961-1990 y 1971-2000.

Las condiciones meteorológicas se pueden interpretar desde el punto de vista del tiempo atmosférico, como el conjunto de valores de los elementos meteorológicos en determinado lugar y tiempo. Estos elementos varían constantemente. A los efectos del concepto de clima, las condiciones meteorológicas están referidas a aquellas que con más frecuencia se presentan en el lugar. La sucesión de valores que se repiten cada año, cada día y cada mes, se llama régimen normal y se relaciona con el concepto de clima. El régimen real de la propia variable meteorológica, cambia de un día a otro y de un año a otro, por lo que este se relaciona con el concepto de tiempo atmosférico.

¿Son iguales los regímenes climáticos en el planeta?

No, existe una gran diversidad de climas en el mundo. Ellos se clasifican mediante índices que en general se basan en el comportamiento de la temperatura, la precipitación, la vegetación, la humedad etc.

¿Cuáles son los agentes que determinan esta variedad climática?

Los agentes que determinan en cada punto el régimen vigente para cada elemento climatológico se llaman factores del clima.

Los factores del clima, en el Vocabulario Meteorológico Internacional (OMM, 1992), se definen como: condiciones físicas, distintas de los elementos climáticos que habitualmente influyen sobre el clima, por ejemplo: latitud del lugar, altitud, distribución de tierras y mares, topografía, corrientes marinas, etc.

Cada factor actúa sobre todos los elementos, aunque en grado desigual. Los principales factores se incluyen en tres grupos:

Meteorológicos: en gran medida son aleatorios, por ejemplo: frentes y masas de aire, régimen de radiación solar, régimen de vientos.

Astronómicos: actúan periódicamente, posición relativa entre la Tierra y el Sol, movimientos de rotación y

traslación terrestres, inclinación del eje de la órbita terrestre, y los ciclos de actividad solar.

Geográficos: son «fijos» e «invariables», por ejemplo: latitud, distribución desigual de mares y tierras, tipo de suelo y vegetación, corrientes marinas y cubierta nubosa.

La acción del hombre sobre el clima también hay que tenerla presente, mediante el desarrollo de las actividades socioeconómicas cambia la composición química de la atmósfera incrementando en ella Gases de Efecto Invernadero que intensifican este fenómeno natural. También modifica la superficie subyacente variando con ello la reflectividad de las superficies y otros aspectos de interés para el ciclo hidrológico. El incremento de las infraestructuras varía el régimen de vientos locales existentes y el aumento de las ciudades por su parte incide en el incremento de la temperatura del aire.

Clima y sistema climático

El clima también se define como el estado físico promedio del sistema climático. O sea el clima no está asociado únicamente con lo que sucede en la atmósfera. Ha sufrido muchos cambios en el pasado y continuará cambiando en el futuro. Siempre está evolucionando, se puede considerar una entidad viva. Con ello se borra el concepto de la naturaleza constante del clima.

El sistema climático es aquel que agrupa los cinco componentes del sistema geofísico, o sea, la atmósfera y los otros cuatro componentes que interactúan directamente con ella, quienes de forma conjunta determinan el clima. Los subsistemas del sistema climático son la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera.

Características de los componentes del sistema climático

Atmósfera

La atmósfera se hace más compleja debido a la presencia de varias sustancias en suspensión: agua líquida y sólida (nubes), partículas de polvo, aerosoles de sulfato, cenizas volcánicas.

No obstante su poca masa y espesor, es el componente central del sistema climático. Se puede dividir en varias capas separadas, en las cuales existen diferentes composiciones, temperatura, estabilidad y energía.

Hidrosfera

Está compuesta por toda el agua líquida distribuida sobre la Tierra. Incluye los océanos, mares interiores, ríos y aguas subterráneas.

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.

Criosfera

Está compuesta por las grandes masas de nieve y hielo de la superficie de la tierra. Incluye los extensos campos de hielo de Groenlandia y Antártida, otros glaciares continentales y campos de nieve, el suelo helado (permafrost) así como el hielo oceánico permanente o perpetuo.

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. Las 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 interglaciales.

Litosfera

Comprende a los continentes (cuyo relieve modifica el movimiento del aire) y el fondo oceánico. Incluye la capa activa superficial, en la cual la temperatura y el contenido de agua pueden variar como respuesta a fenómenos atmosféricos y oceánicos.

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.

Biosfera

Está constituida por la flora y la fauna marina y terrestre, y en extensión por el hombre. 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. 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.

VARIACIONES Y CAMBIOS DEL CLIMA

Como el clima es el resultado de las complejas interacciones de muchos componentes, su comportamiento resulta muy dinámico y no lineal, lo cual está muy lejos de la visión o percepción errónea de que el clima se puede definir solamente por los valores medios de las diferentes variables que caracterizan el estado de la atmósfera. Así, el clima es dinámico y presenta una variabilidad intrínseca.

Variabilidad natural del clima

En el sentido más general, el término variabilidad climática se refiere a las variaciones temporales que se producen en el clima y que son una característica intrínseca de este. La variabilidad climática se mide por las desviaciones de los valores de los elementos climáticos a lo largo de un período de tiempo dado respecto a estadísticas climáticas a largo plazo, denominadas anomalías climáticas.

El hombre se ha enfrentado tradicionalmente a las variaciones temporales del clima. El desarrollo secuencial de las estaciones del año influye sobre la vida en todo el planeta. La evolución del clima entre las estaciones del año es definida por los climatólogos como variabilidad estacional (Figura 5). Las variaciones estacionales afectan las necesidades humanas. Para subsistir y desarrollarse, la humanidad ha aprendido a adaptarse a los cambios de las estaciones.

Pero las estaciones del año no siempre poseen el mismo comportamiento, alterando la vida normal de muchas especies y de los seres humanos. Desde el pasado lejano, el hombre ha experimentado años de abundancia, alternados con años de hambre, lo que ha constituido una de las mayores preocupaciones de las sociedades a través 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 (Figura 6).

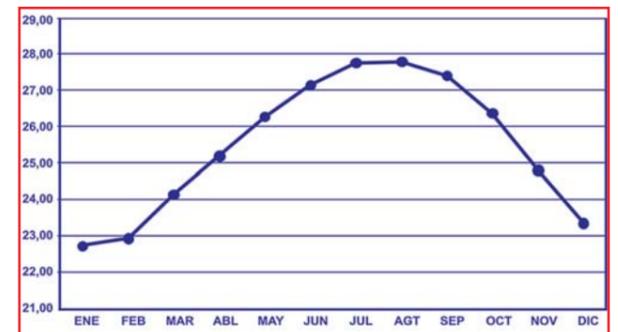


Fig. 5. Temperatura media mensual (período 1961-1990) de Cuba como ejemplo de la variabilidad estacional del clima.

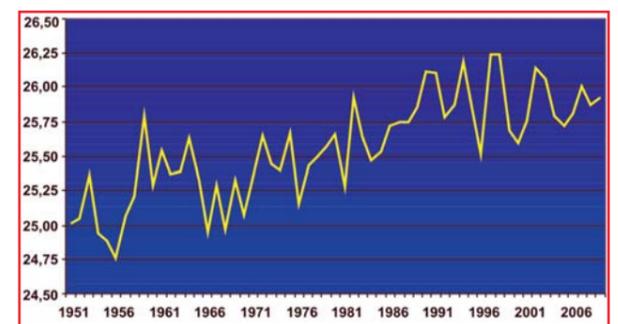


Fig. 6. Temperatura media anual de Cuba entre 1951 y el 2009. Ejemplo de variabilidad interanual del clima. Obsérvese las diferencias entre un año y otro.

Sin embargo, la variabilidad climática se expresa también en escalas mayores de tiempo. El clima no sólo se puede diferenciar entre un año y otro, sino también entre una época y otra, fluctuación a la que se le denomina variabilidad multianual, o multidecadal, según sea el caso. En la figura 7 se observa cómo la temperatura media anual de la estación meteorológica de Casablanca ha presentado períodos de tiempo en los que han predominado las anomalías negativas, años menos cálidos, y períodos en que estas anomalías han tomado valores positivos, años más cálidos.

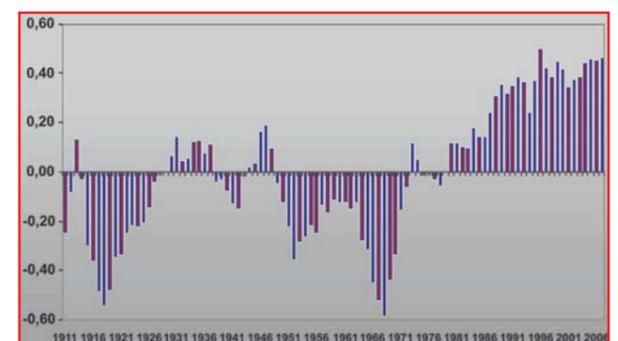


Fig. 7. Medias móviles de las anomalías de la temperatura media anual de Casablanca, Ciudad de La Habana, entre 1951 y el 2009. Ejemplo de variabilidad multianual del clima. Obsérvese las diferencias entre unos períodos de tiempo y otros.

Las anomalías climáticas no sólo se presentan en el comportamiento de los elementos del clima sino también en la frecuencia de los sistemas meteorológicos de la circulación atmosférica, incluyendo los ciclones tropicales.

En las últimas décadas, el tema de la variabilidad climática ha sido centro de gran atención, debido a las anomalías climáticas extremas ocurridas en muchas 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. Sin embargo, la variabilidad del clima también 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.

Las complejas interacciones entre las diferentes componentes del Sistema Climático tienen una profunda influencia en la variabilidad del clima. La mayoría de las anomalías de los climas regionales están relacionadas con cambios en la circulación oceánica y atmosférica. La temperatura superficial del mar posee una significativa influencia sobre la circulación atmosférica. A su vez, la temperatura del mar también posee sus propias variaciones, relacionadas con cambios en la circulación oceánica.

El factor regulador más importante de la variabilidad climática que se conoce, es el denominado evento «El Niño»-«La Oscilación del Sur» (ENOS). El ENOS es un gran ejemplo de la interacción océano-atmósfera. Un evento ENOS es capaz de influir considerablemente sobre la circulación general de la atmósfera. Sobre el Pacífico Ecuatorial los patrones de la circulación atmosférica cambian durante un evento de sobrecalentamiento. Esto tiene un impacto dramático en las corrientes atmosféricas subtropicales provocando cambios en los patrones estacionales del tiempo atmosférico sobre Norte y Sur América y otras partes del planeta en un proceso denominado «Teleconexiones».

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. Estos patrones recurrentes forman la base de los sistemas de avisos y alertas frente a la aparición de un evento ENOS y constituyen elementos claves en los modelos de predicciones climáticas.

Existen otros procesos, no menos complejos, que constituyen factores que en alguna medida «regulan» la variabilidad interanual del clima en los trópicos como la «Oscilación Cuasibienal».

La Oscilación Cuasibienal (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, pudiendo variar entre 22 y 36 meses.

Cambios climáticos

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.

Aunque las características del clima tienden a permanecer estables, alrededor de ciertas condiciones de régimen y variabilidad, durante períodos de tiempo muy largos, en el pasado se han producido cambios importantes en el clima relacionados con causas de origen natural como:

- Cambios en la actividad solar.
- Variaciones cíclicas de la órbita terrestre.
- Procesos internos naturales del sistema climático.

El efecto combinado que una serie de variaciones cíclicas del movimiento de la Tierra produce sobre el clima terrestre al influir en la cantidad de energía solar que nos llega, se resume en la denominada teoría de Milankovitch. Se incluyen entre ellas variaciones en la inclinación del eje de rotación, la precesión y la variación en la forma de la órbita (excentricidad) de la Tierra.

Milankovitch hizo notar que estas variaciones cíclicas provocaban una diferenciación periódica en la cantidad de energía o radiación solar que recibía el planeta. Los 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.

Sin embargo, en la actualidad, a los factores naturales antes descritos se han sumado factores antropogénicos, como el aumento de las concentraciones atmosféricas de GEI debido a sus emisiones, a la deforestación y al cambio del uso de la tierra.

Hay que destacar que los cambios ocurridos en el clima global durante el pasado siempre tuvieron un importante impacto para el desarrollo de las especies. En algunos casos este impacto fue sencillamente dramático.

Variabilidad del clima y eventos climáticos extremos

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).

Durante las últimas tres décadas Cuba se ha enfrentado a diferentes eventos climáticos extremos. Entre ellos se destacan:

- Eventos ENOS 1982-1983 y 1997-1998.
- Incremento de la actividad de huracanes ocurrido desde 1996. Ello incluye un número extraordinario de huracanes intensos entre los años 2001 y 2009.
- Frecuente ocurrencia de eventos de sequía, entre ellos la intensa sequía 2003-2005.
- Lluvias intensas e inundaciones asociadas a ellas.
- Inundaciones costeras ocurridas, asociadas a huracanes o a sistemas extratropicales.

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, llamadas comúnmente estrategias de manejo de riesgos.

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:

- La población bajo riesgo.
- Las propiedades o infraestructuras económicas bajo riesgo.
- El nivel de preparación.

Los dos primeros 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. 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 los mismos impactos en la sociedad. Primero, esto depende de su característica física (intensidad, duración, etc.) que gobierna el nivel de exposición al riesgo y segundo, del nivel de preparación en materia de reducción de desastres, el cual es crucial en términos de disminución de la vulnerabilidad y el riesgo.

En relación con el enfrentamiento de los eventos climáticos extremos y su impacto, existe en Cuba una experiencia e historia de más de 40 años. A lo largo de estos años se han adoptado políticas y decisiones de envergadura, lográndose resultados ejemplares en la labor relacionada con la reducción de los desastres naturales.

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 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 en él se da prioridad a la preservación de la vida humana. La estrecha conexión de los tomadores de decisiones con los centros que integran la red de vigilancia, 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 los diferentes eventos relacionados con el clima, también constituye un aspecto a destacar. Ello también resulta de gran ayuda en la ejecución de los planes de preparación y respuesta.

Las acciones emprendidas por el Gobierno de Cuba después de la afectación del huracán Flora, se pueden considerar 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.

El trabajo de reducción de desastres se basa en la actualidad en el conocimiento del riesgo, la prevención y la reducción de la vulnerabilidad. Es importante comprender la relación existente entre estos aspectos y las medidas de adaptación a la variabilidad climática actual. Los resultados que se obtuvieron durante el enfrentamiento avalan lo acertado de las políticas adoptadas y el nivel de la experiencia acumulada, no sólo válida para Cuba sino para los países vecinos.

Variaciones observadas en el clima de Cuba

Las evidencias observacionales indican claramente que el clima de Cuba se ha hecho más cálido. Desde mediados del pasado siglo la temperatura media anual ha aumentado cerca de 0,9 °C. La década del 90, así como la actual, han sido las más cálidas, destacándose los años 1997 y 1998 como los de mayor registro en esta serie climática, hasta el momento. No obstante, se ha producido un ligero descenso de la temperatura superficial desde comienzos de los años 90, lo que se puede apreciar como una estabilización del elemento alrededor de un valor medio muy alto. Asociado a este comportamiento se ha observado una tendencia muy marcada de las temperaturas mínimas, que han sufrido un ascenso, alrededor de 1,9 °C en sus valores medios mensuales.

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 °C.

Los totales anuales de precipitación han mostrado una ligera y no significativa tendencia al incremento. Las lluvias del período poco lluvioso se han visto incrementadas, acompañadas de un aumento de las anomalías extremas. Sin embargo, la variación más importante de este elemento climático se relaciona con la tendencia a la disminución en la región oriental del país, que desde la década del 90 ha manifestado significativos déficit en los acumulados de precipitación.

El significativo incremento que los eventos de sequía registraron en el período 1961-1990 con respecto al 1931-1960, ha mantenido su continuidad en los persistentes eventos de sequía que afectaron la mitad oriental del país desde principios de los años 90, acentuándose estos hasta culminar con el gravísimo evento acontecido en mayo del 2003 hasta mayo del 2005, el cual progresivamente se extendió a todo el país.

Desde 1996 se inició un nuevo período muy activo de la actividad de huracanes sobre Cuba, principalmente desde el año 2001, de manera que, entre el 2001 y el 2008, el país ha sido afectado por nueve huracanes. Sin embargo, si bien existe una ligera tendencia creciente a largo plazo en la frecuencia de huracanes sobre Cuba (1791-2008), esta no es estadísticamente significativa. Es de suma importancia la ocurrencia de siete huracanes intensos desde el 2001, cifra que no se había registrado en década alguna desde 1791. Este record se asocia a los muy altos valores de la temperatura del mar en el Caribe registrados desde 1998. Sin embargo, no se encontró la existencia de una tendencia creciente, estadísticamente significativa de la actividad a lo largo de la serie de más de 200 años. No por ello deja de ser sumamente importante su comportamiento, ya que constituye una de las más peligrosas variaciones observadas en el clima de Cuba en los años recientes.

En resumen, los cambios sufridos por el clima en Cuba durante las últimas cuatro décadas se asemejan a las proyecciones del Panel Intergubernamental de

Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) para un efecto invernadero incrementado en la atmósfera.

EFFECTO INVERNADERO. GASES DE EFFECTO INVERNADERO

Los resultados de mediciones y modelación confirman que el incremento observado en las temperaturas promedio en la superficie terrestre, desde mediados del siglo xx, es muy probable¹⁷ se deba al aumento en la atmósfera de las concentraciones de GEI derivados de las actividades humanas.

Efecto invernadero natural

La Tierra tiene un efecto natural de invernadero que proporciona a nuestro planeta un delicado equilibrio sin el cual el hombre no podría habitarlo. Parte de la energía solar que llega a la Tierra en forma de radiación de onda corta es reflejada al espacio, pero otra parte pasa a través de la atmósfera sin ejercer en ella un efecto térmico directo significativo, y calienta la superficie de nuestro planeta. La Tierra «elimina» energía en radiaciones infrarrojas de onda larga, parte de la cual queda absorbida en la atmósfera por el vapor de agua, el dióxido de carbono y otros gases, obstaculizando la emisión directa de energía al espacio desde la superficie del planeta, parecida a como lo hacen los paneles de vidrio de un invernadero (Figura 8). Por ello el proceso descrito, se conoce como «efecto invernadero» y a los gases que participan en él se les denomina «gases de efecto invernadero».

Si la energía superficial se pudiera irradiar al espacio sin obstáculo alguno, esto supondría un descenso de la temperatura de más de 30 °C y la temperatura global de la Tierra sería aproximadamente -18 °C, demasiado fría para las condiciones en que conocemos se desenvuelve la vida.

Efecto invernadero incrementado por las actividades humanas

Los gases de efecto invernadero (GEI) desempeñan un papel esencial en la preservación del equilibrio entre la energía entrante y saliente del sistema Tierra-atmósfera y bajo condiciones naturales sus concentraciones en la atmósfera son poco perturbadas. Sin embargo, las emisiones de los GEI por las actividades humanas modifican sensiblemente este equilibrio provocando un efecto invernadero «adicional o incrementado». Este desequilibrio se cuantifica como «forzamiento radiativo»¹⁸. Si el forzamiento radiativo es positivo tiende a calentar la superficie y si es negativo tiende a enfriarla. Un forzamiento radiativo positivo impuesto al sistema Tierra-atmósfera representa un excedente de energía. Cuando esto ocurre la temperatura de la superficie y de la atmósfera inferior aumentan e incrementan a su vez la cantidad de radiación infrarroja que se emite al espacio, estableciéndose un nuevo balance de energía.

En la medida en que se incrementan las concentraciones de GEI en la atmósfera, el clima se ve obligado a adaptarse o modificarse para mantener en equilibrio el balance energético del sistema climático. Por la estrecha relación que existe entre la radiación infrarroja y la temperatura, esta modificación puede provocar, entre otras consecuencias, un calentamiento de la superficie de la Tierra y de la atmósfera inferior y con este calentamiento otros cambios conexos en el clima.

Gases trazas de importancia para el clima

Ciertos GEI surgen naturalmente pero también tienen fuentes directas e indirectas en las actividades humanas. Otros son totalmente producidos por las actividades humanas. Entre los primeros se encuentran, el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el ozono (O₃), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). Los GEI completamente antrópicos son los clorofluorocarbonos (CFC), hidrofluorocarbonos (HFC), hidroclorofluorocarbonos (HCFC) (denominados colectivamente como halocarbonos), perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆).

Aunque la mayoría de los GEI directo o indirecto (estos últimos también conocidos como gases precursores de GEI) tienen importancia para el clima y para 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 los que son más importantes los GEI directo que:

- Tienen largo tiempo de vida en la atmósfera (les posibilita distribuirse y mezclarse en esta a nivel mundial).
- Tienen alto nivel de potencial de calentamiento atmosférico.
- Tienen fuentes (directas o indirectas) importantes en las actividades humanas.
- Presentan composición química favorable (por ejemplo cantidad de cloro y bromo contenido en cada molécula para los GEI que también son SAO¹⁹).
- Tienen emisiones significativas a la atmósfera.

Debido a las actividades humanas se producen emisiones de una gran cantidad y variedad de GEI. Un grupo de esos GEI es controlado por la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) y su Protocolo de Kyoto, mientras que otros son controlados por el Protocolo de Montreal sobre las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono²⁰. De todos esos gases, cinco son conocidos como «gases mayores de efecto invernadero de larga vida (GEILV)» y aportan cerca del 96% del incremento del forzamiento radiativo directo de los GEILV desde 1750. Estos son, por orden de importancia:

- Dióxido de carbono (CO₂); metano (CH₄); óxido nitroso (N₂O), que se encuentran bajo control de la CMNUCC y su Protocolo de Kyoto,

• Clorofluorocarbono 11 (CFC-11) y Clorofluorocarbono 12 (CFC-12) que se encuentran regulados por el Protocolo de Montreal Sobre Sustancias Agotadoras del Ozono.

El restante 4% del incremento del forzamiento radiativo directo es aportado por quince «gases halogenados menores de efecto invernadero de larga vida». Una parte importante de estos GEI menores son también SAO. El forzamiento radiativo de los GEILV aumentó cerca del 26% entre los años 1990 y 2008. El CO₂ aportó cerca del 80% de este incremento.

Sobre la base de diversos criterios se han seleccionado, para

ser tratados en los inventarios de emisiones y remociones de GEI bajo la CMNUCC, los gases atmosféricos de mayor relevancia para el clima. Por conveniencia todos son genéricamente referidos como GEI, aunque algunos de ellos no lo son, por lo que se pueden subdividir en:

- a) Gases de efecto invernadero directo²¹



- b) Otros gases de importancia radiativa y fotoquímica (gases precursores)

Monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), COVDM (compuestos orgánicos volátiles distintos al metano) y Dióxido de azufre (SO₂).

La importancia de estos gases (b) está dada por su papel como precursores de GEI, modificadores de sus concentraciones en la atmósfera o precursores de aerosoles como el SO₂.

Nivel y tendencias de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera

De los cinco mayores GEILV, las concentraciones atmosféricas del CO₂ y el N₂O continúan incrementándose a un ritmo regular y establecen un nuevo record cada año. El promedio mundial de las concentraciones de CO₂ alcanzó a finales del 2007 los 383,1 ppmv²² (137% del nivel existente en el período pre-industrial²³). En el 2008 este valor era alrededor de los 385 ppmv. La tasa de crecimiento de las concentraciones de este GEI tuvo como promedio mundial cerca de 1,65 ppmv por año en los últimos 30 años del período 1979-2008, aunque después de 1995 alcanzó los 1,91 ppmv por año. A partir del año 2000 se ha acelerado más el incremento de las concentraciones de este GEI. La concentración media global de N₂O alcanzó a finales del 2007 los 320,9 ppbv²⁴ (119% del nivel existente en el período pre-industrial). Sus concentraciones atmosféricas continúan aumentando con una tasa de crecimiento relativamente uniforme.

El CH₄ es el segundo GEI en importancia después del CO₂. En el año 2007 su concentración promedio global alcanzó los 1789 ppbv (256% del nivel existente en el período pre-industrial. Contrario a lo descrito anteriormente, para el CO₂ y el N₂O la tasa de crecimiento del CH₄ disminuyó entre 1983 y 1999 consistente con un comportamiento cercano al estado estacionario de las concentraciones. Entre los años 1999 y 2006 sus concentraciones atmosféricas se mantuvieron cercanamente constantes, pero en los años 2007 y 2008 su promedio global comenzó de nuevo a incrementarse. Las causas de estos incrementos están bajo estudio y se manejan diferentes hipótesis al respecto.

Las concentraciones atmosféricas de los CFC cesaron su incremento alrededor del año 1992 y en la actualidad están disminuyendo para la mayoría de estos gases como consecuencia de la reducción de sus emisiones a partir de las acciones instrumentadas en el marco del Protocolo de Montreal.

Emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de GEI se producen tanto en procesos naturales como en actividades del hombre. Algunos de los GEI tienen ambas fuentes, mientras que otros solamente tienen un origen antrópico. Entre las actividades humanas que generan emisiones directas o indirectas de GEI, existe un grupo que, por su importancia, centra 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: energía, procesos industriales, uso de solventes, agricultura, cambio de uso de la tierra y silvicultura, y desechos.



Fig. 8. Efecto invernadero.

El sector Energía es prácticamente el más importante para las emisiones de GEI y normalmente contribuye por encima del 90% de las emisiones de CO₂ y del 75% del total de las emisiones de GEI en los países industrializados. También, en gran parte de los países en desarrollo, este sector tiene las mayores contribuciones a las emisiones. Los gases más significativos derivados de la quema de combustibles para energía son el CO₂, los NO_x y el SO₂. También de alguna importancia son las emisiones de los COVDM, CH₄, CO, N₂O y a un nivel casi marginal el amoníaco (NH₃). Las emisiones fugitivas son liberaciones o escapes de gases, intencionales o no, desde las actividades antrópicas. En el sector Energía estas emisiones se derivan de la producción, procesamiento, transmisión, almacenamiento y uso de los combustibles e incluyen emisiones desde la combustión solamente en el caso donde esta no soporta una actividad productiva por ejemplo, la quema en antorchas del gas natural. La emisión más significativa de las emisiones fugitivas corresponde al CH₄.

La captura y el almacenamiento de CO₂ es una opción relativamente nueva incluida en la cartera de medidas que se pueden tomar para reducir las emisiones de GEI producto del uso de los combustibles fósiles. En este subsector se estiman las emisiones del transporte, la inyección y el almacenamiento geológico de CO₂.

Los datos de emisiones de GEI disponibles provienen de dos tipos de fuentes principales con diferencias importantes: los datos oficiales de emisiones transmitidos a la CMNUCC por los países y sometidos a revisión y control de calidad por esta y las estimaciones y cálculos que realizan diferentes instituciones y organizaciones internacionales y de algunos países.

Los países industrializados 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. El último reporte disponible, hasta la fecha, corresponde al año 2007 dado a conocer a finales del 2009. Los 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. La mayor parte de los reportes de emisiones disponibles para los países en desarrollo, salvo excepciones, corresponde a los años 1990 y 1994 utilizados, alternativamente, como año base en los inventarios de emisiones y remociones de estos países. En la actualidad, en su mayoría, trabajan en la preparación del reporte del inventario para el año 2000. Así, los datos de emisiones mundiales disponibles proceden fundamentalmente de estimaciones realizadas por diferentes instituciones. Desde la Revolución Industrial, las emisiones anuales de CO₂ derivadas de la quema de combustibles vienen incrementándose exponencialmente (desde cerca de cero hasta 29 Gt CO₂ en el 2007). De no aplicarse, con urgencia, medidas para su mitigación se espera que estas emisiones sigan creciendo y alcancen los 40,2 Gt CO₂ en el 2030 en concordancia con el peor escenario presentado en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC en 2007. En este comportamiento histórico de las emisiones de GEI resaltan los siguientes aspectos:

- En el notable crecimiento de las emisiones de GEI a la atmósfera derivadas de las actividades humanas y el incremento del efecto invernadero tienen un peso y responsabilidad fundamental los países industrializados pues el volumen de sus emisiones acumuladas de GEI, especialmente el CO₂ derivado de la quema de combustibles fósiles, a partir de 1750 supera con creces a la de los países en desarrollo.
- Los países industrializados, especialmente los mayores emisores, tienen emisiones per cápita muy superiores a las de la gran mayoría de los países en desarrollo. El nivel de las emisiones per cápita de CO₂ de la energía en el 2007 variaba desde 1 t CO₂/persona en India, 5 t CO₂/persona en China, 19 t

CO₂/persona en Estados Unidos hasta valores superiores a este último en algunos países.

- Algunos países identificados como «economías emergentes» tienen también en la actualidad altos niveles de emisiones de GEI, pero tienen bajos niveles de acumulación de emisiones a partir de 1750 y comparativamente bajas emisiones per cápita.
- En la última década se reportan crecimientos importantes de las emisiones de las Partes No Anexo I de la CMNUCC especialmente en Asia. Se relacionan estos incrementos al mayor uso de carbón en energía.
- Algunos indicadores preliminares sugieren una disminución de las emisiones a partir del 2008 como resultado de la crisis económica global.

Emisiones de GEI en los países industrializados

Un total de 41 países industrializados integran el Anexo I de la CMNUCC (por este motivo se les denomina como «Partes del Anexo I») ²⁵. Este grupo de países está subdividido en dos subgrupos: a) Partes del Anexo I que no son EIT ²⁶, constituido por los países más industrializados (países industrializados que formaban parte de la OECD en 1992); b) Partes del Anexo I que son EIT.

Entre los años 1990 y 2007 las emisiones brutas ²⁷ agregadas ²⁸ totales de GEI para todas las Partes del Anexo I disminuyeron en 3,9%. En ese período, las emisiones de las Partes del Anexo I que no son EIT eran en el 2007 11,2% mayor que en el año base 1990, mientras que las emisiones de las Partes del Anexo I que son EIT eran en el 2007 37,0 menor que en 1990.

Tanto para el año base 1990 como en el año 2007 el mayor peso en las emisiones brutas totales correspondieron al CO₂ (80,0% de las emisiones en 1990 y 82,8% en el 2007). Entre 1990 y el 2007 las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O disminuyeron mientras que se observaron incrementos en las emisiones de HFC, PFC y SF₆ (tomadas de conjunto). No obstante, a partir del 2006 se observaron incrementos en las emisiones de todos los GEI controlados por la CMNUCC.

Con relación al sector de la Energía, entre 1990 y el 2007 crecieron las emisiones en el subsector «Transporte» (+ 17,9%) y en el subsector «Industrias de la Energía» (+ 5,6%) mientras que disminuyeron en los subsectores «Industrias Manufactureras y Construcción» (- 11%), «Emisiones Fugitivas» (- 15,7%) y «otros sectores» (- 17,3%).

Emisiones de GEI 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, perteneciente a la Agencia de Medio Ambiente (AMA) del CITMA y con la participación de especialistas de diferentes instituciones y organismos del país. Se han realizado estudios de emisiones y remociones de GEI para los años pares del período 1990-2004 y se trabaja actualmente en el reporte correspondiente al año 2006.

El total de las emisiones brutas agregadas de GEI de Cuba en el año 2004 resultó 23,5% menor que en el año base 1990. Los mayores aportes, a estas emisiones, provienen del sector Energía (70,5% en el año 2004) seguido del sector Agricultura (18,9% en ese propio año). Los sectores Procesos Industriales y Desechos tienen un aporte menor y el sector Uso de Solventes, un aporte insignificante. Con relación a la contribución de los gases, corresponde al CO₂ el peso fundamental con aportes relativos que variaron entre 71,2% de las emisiones en 1990 y 66,6% de estas en el año 2004. El CH₄ sigue en importancia al CO₂ en estas emisiones y presenta un incremento del aporte relativo a las emisiones agregadas en el período (15,4% en 1990 y 24,6% en el año 2004). El N₂O cerró el año 2004 con una contribución relativa a las emisiones del 8,8%, menor a la del año base 1990 (13,5%).

CALENTAMIENTO GLOBAL Y CAMBIO CLIMÁTICO

Hace más de 100 años, en 1856, la revista *Philosophical Magazine* publicó un artículo del científico sueco Svante Arrhenius, titulado «Sobre la influencia del ácido carbónico en la temperatura del aire sobre la tierra» relacionando la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera y el incremento de la temperatura. Este científico afirmaba que la quema de petróleo y carbón podría causar el calentamiento de la atmósfera, estimando que una duplicación del (CO₂) conduciría a un incremento de la temperatura entre 4 y 6 grados Celsius.

En 1975, en un coloquio sobre las fluctuaciones climáticas a largo plazo, la comunidad científica inició un examen de las pruebas disponibles sobre un posible cambio del clima del planeta. Más tarde en 1979, durante la Primera Conferencia Mundial del Clima, se realizó una evaluación de los efectos de las actividades humanas sobre el clima mundial y de la capacidad para predecirlo. En ese mismo año el científico Wallace Broecker acuñó la frase «calentamiento global», cuando publicó un artículo bajo el título «Cambio climático: ¿Estamos al borde de un pronunciado calentamiento global?».

La conferencia científica de Villach, Austria, convocada en 1985 para evaluar el papel del aumento del (CO₂) y otros gases en la atmósfera sobre las variaciones climáticas y sus impactos, concluyó que el calentamiento del clima era prácticamente inevitable y que la magnitud de este dependería de las políticas relacionadas con el uso de la energía y de los combustibles fósiles. También arribó a la conclusión, que ha dejado de ser válida la hipótesis de la que se parte en la actualidad, según la cual los datos sobre el clima pasado constituyen una guía segura para el futuro al adoptar un gran número de decisiones importantes en la esfera económica y social, teniendo en cuenta el calentamiento global (Organización Meteorológica Mundial, 1986). Esta conclusión tiene enormes implicaciones particularmente en el campo del diseño de los sistemas de refrigeración y climatización y de los grandes proyectos de ingeniería.

Un decisivo impulso al problema del cambio climático relacionado con la influencia de las actividades humanas sobre el clima, lo propició la aprobación por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 1988, de la resolución titulada «La protección del clima para las generaciones presentes y futuras». Esta resolución condujo a la creación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, conocido como IPCC (por sus siglas en inglés), auspiciado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (PNUMA). El IPCC produce las evaluaciones más rigurosas y autorizadas del conocimiento sobre cambio climático, basadas en una amplia revisión de la literatura relativa a los aspectos científicos, tecnológicos y socioeconómicos del tema. Estas evaluaciones, que sirven de referencia para la comunidad científica y los tomadores de decisiones, también han constituido la base para los debates políticos internacionales en torno al cambio climático. Su primer informe se presentó en 1990 y fue decisivo para comenzar el proceso de negociación internacional que culminó con la adopción en 1992 del texto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. El IPCC ha producido hasta el momento cuatro informes de evaluación.

Cambios observados en el clima

En su Cuarto Informe de Evaluación el IPCC, 2007a, concluyó que «el calentamiento del sistema climático es inequívoco», lo que es 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 (Figura 9). Es muy probable que el incremento del aporte de los GEI al calentamiento global no haya tenido precedentes en más de diez mil años.

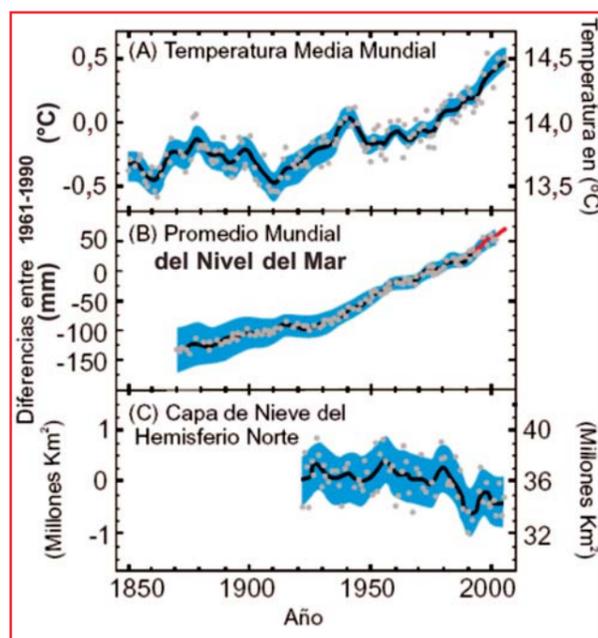


Fig. 9. Cambios observados en a) la temperatura media mundial de la superficie terrestre; b) media mundial del aumento del nivel del mar tomada con mareógrafo (azul) y datos de satélite (rojo) y c) las capas de nieve del hemisferio norte de marzo a abril. Todos los cambios son relativos a las medias correspondientes al período 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). Fuente IPCC, 2007.

Los registros de la temperatura media global de los 100 años comprendidos entre 1906 y 2005 indican un calentamiento de la tierra de 0,74 °C. Los 10 años más calurosos del período comprendido entre 1850 y 2007, se ubican desde 1995 hasta el propio año 2007. Los años 1998 y 2005 clasifican como los más calurosos en ese mismo orden. Los días y noches frías, junto a las olas de frío se han tornado menos frecuentes, mientras que las olas de calor y los días y noches cálidas incrementaron su frecuencia. Es probable que el incremento de las temperaturas medias a nivel mundial desde mediados del siglo xx se deba al evidente aumento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero antropogénicos 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 2,7% por década, con mayores disminuciones en el verano. En el período 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, al menos, 3000 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.

Debido al 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. Estos 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 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 0,17 m; y es muy probable que la actividad humana haya contribuido a este incremento.

El evidente 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 se pueda explicar obviando los elementos externos, asociados a la actividad humana (antropogénica); y es muy probable que no se deba únicamente a causas naturales conocidas.

Proyecciones climáticas

¿Qué herramientas se emplean para proyectar el clima futuro?

El impacto de las perturbaciones antropogénicas sobre el sistema climático se puede proyectar, 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, estas formulaciones sólo se pueden implementar 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 están 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 se pudiera incorporar 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.

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

La proyección del cambio climático utilizando los modelos climáticos se puede explicar de manera simple. La primera etapa, que no se incluye explícitamente dentro de los modelos climáticos, consiste en estimar los posibles perfiles de emisiones futuras de GEI y otros compuestos. Los perfiles de emisiones de GEI, también denominados escenarios de emisiones, se obtienen a partir de modelos independientes que tienen en consideración el crecimiento poblacional, el empleo de la energía, el desarrollo tecnológico, etc.

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. 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 señalar 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 3,8 W/m². En términos simples, este 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. Por un lado, las retroalimentaciones tienden a reforzar el cambio inicial (retroalimentación positiva) o a debilitar este (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, su mayor concentración incrementa el calentamiento inicial. Por otro, un incremento de la concentración de CO₂ aumenta la velocidad de crecimiento de las plantas (efecto de fertilización por incremento de la fotosíntesis) las que a su vez absorben más CO₂, actuando como una retroalimentación negativa.

¿Cuáles serán los cambios más significativos en el futuro?

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

- El calentamiento promedio global de la superficie asociado a una duplicación de las concentraciones de CO₂ es probable que esté en el intervalo de 2 a 4,5 °C, con un mejor estimado de 3 °C.
- Para las próximas dos décadas se proyecta un calentamiento, alrededor de 0,2 °C por década, para el conjunto de escenarios de emisiones considerados en este estudio. Incluso, 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 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) teniendo como referencia el promedio de las últimas dos décadas del siglo XX.
- El 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, teniendo como referencia el nivel promedio de las últimas dos décadas del siglo XX.
- El incremento de las concentraciones atmosféricas de CO₂ conducen a un incremento de la acidificación de los océanos.
- Las emisiones antropogénicas pasadas y futuras de CO₂ 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.

Impactos del cambio climático

No basta con conocer como sería el clima del futuro, es necesario también contar con el conocimiento de cuáles serían las consecuencias del cambio climático. En su Cuarto Informe el IPCC (2007b) señala que las evidencias observadas en todos los continentes y en la mayoría de los océanos muestran que el cambio climático, en particular el aumento de la temperatura, afecta a muchos sistemas naturales, considerando como

cambio climático toda variación del clima a lo largo del tiempo, por efecto de la variabilidad natural o de las actividades humanas. Este uso difiere del adoptado en la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, donde se define cambio climático todo cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables. A las consecuencias del cambio climático en sistemas humanos y naturales se le identifica como impacto climático. Son impactos potenciales los que pueden ocurrir ante un cambio proyectado en el clima, sin tener en cuenta las medidas de adaptación y residuales los que pueden ocurrir después de la adaptación.

Impactos observados del cambio climático

El Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (2007b) afirma que en los continentes y en la mayoría de los océanos, muchos sistemas naturales se están viendo afectados por los cambios en los climas regionales, particularmente por los incrementos de temperatura como son:

- Ampliación y aumento del número de lagos glaciares²⁹.
- Aumento de la inestabilidad del terreno en regiones de permafrost³⁰ y avalanchas de rocas en regiones montañosas.
- Cambios en algunos ecosistemas árticos y antárticos.
- Aumento de la escorrentía y adelanto del nivel máximo de la descarga de primavera en muchos ríos que se abastecen de nieve y de glaciares.
- Calentamiento de ríos y lagos en muchas regiones, provocando efectos en la estructura térmica y la calidad del agua.
- Adelanto de los fenómenos de primavera, como el brote de las hojas y la migración de las aves.
- Cambios en el desplazamiento hacia la zona polar y zonas de mayor altitud del ámbito en especies vegetales y animales.
- Cambios en las zonas de distribución y en la abundancia de algas, plancton y peces en océanos de latitudes altas.
- Aumento de la abundancia de algas y zooplancton en lagos de altitudes y latitudes altas.
- Cambios en las zonas de distribución y migraciones más tempranas de los peces en los ríos.

El IPCC señala que están surgiendo otros efectos de los cambios climáticos regionales sobre entornos naturales y humanos, aunque muchos son difíciles de percibir, debido a la adaptación y a otras influencias no climáticas. Se han documentado los siguientes efectos por el aumento de la temperatura:

- Efectos en la gestión agrícola y silvicultura en las latitudes altas del hemisferio Norte, como la siembra de cultivos más temprano en primavera y modificaciones en regímenes de alteraciones de los bosques debido a incendios y plagas.
- Efectos en la salud humana, como la mortalidad relacionada con el calor en Europa, vectores de enfermedades infecciosas en algunas zonas y polen alérgico en las latitudes altas y medias del hemisferio Norte.
- Actividades del ser humano en zonas del Ártico (la caza y viajes sobre nieve y hielo) y en elevaciones alpinas bajas (deportes de montaña).

También se reporta que los recientes cambios y variaciones climáticas están comenzando a tener efectos sobre muchos otros sistemas naturales y humanos. Aunque, según la literatura publicada, los impactos todavía no constituyen tendencias establecidas, se incluyen los siguientes ejemplos:

- Los asentamientos humanos en regiones montañosas presentan mayor riesgo de inundaciones súbitas por desbordamiento de lagos de glaciares provocadas por el deshielo de los glaciares. En algunos lugares se comienza a darle respuesta mediante la construcción de embalses y sistemas de drenaje.

- En la región africana del Sahel, condiciones meteorológicas más cálidas y secas provocaron una reducción de la duración de la estación de crecimiento vegetativo, con efectos adversos en los cultivos. En África meridional, estaciones secas más prolongadas y una mayor incertidumbre en las precipitaciones impulsan a tomar medidas de adaptación.
- La subida del nivel del mar y el desarrollo del ser humano están contribuyendo conjuntamente a las pérdidas de los humedales y manglares costeros y al aumento de daños ocasionados por inundaciones costeras en muchas zonas.

El Informe del IPCC (2007b) concluye que «Las limitaciones y lagunas impiden una atribución más completa de las causas de las respuestas de los sistemas observadas al calentamiento antropogénico. En primer lugar, los análisis disponibles son limitados en cuanto a la cantidad de sistemas y lugares considerados. En segundo lugar, la variabilidad natural de la temperatura es mayor a escala regional que mundial, por lo que la identificación de cambios ocasionados por el forzamiento externo se ve afectada. Por último, a escala regional influyen otros factores (el cambio en los usos del suelo, la contaminación y las especies invasivas). Sin embargo, la coherencia entre los cambios observados y modelizados en varios estudios y la concordancia espacial entre el calentamiento regional relevante y los impactos congruentes a escala mundial es suficiente para concluir con confianza alta que el calentamiento antropogénico, durante las últimas tres décadas, ha ejercido una influencia perceptible en muchos sistemas físicos y biológicos».

Impactos futuros proyectados del cambio climático

El Cuarto Informe de Evaluación también aporta información relevante acerca de los cambios futuros proyectados, en el curso del siglo XXI, en seis sectores (recursos de agua dulce; ecosistemas; alimentación; sistemas costeros y costas bajas; industria, asentamientos y sociedad; y salud) y ocho regiones (África, Asia, Australia y Nueva Zelanda, Europa, América Latina, Norteamérica, Regiones Polares y Pequeñas Islas). Los impactos reflejan cambios proyectados en las precipitaciones y otras variables climáticas en adición a la temperatura, el nivel del mar y las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono.

En el sector de agua dulce y su gestión se proyecta una disminución en la disponibilidad de agua dulce de 10-30% en algunas regiones secas en latitudes medias y en los trópicos secos hacia mediados de siglo, algunas de las cuales son áreas bajo estrés hídrico. En las latitudes altas y en algunas áreas tropicales húmedas la disponibilidad de agua se incrementaría entre 10-40%. Se espera una expansión de las áreas afectadas por la sequía; y un aumento en la frecuencia de las precipitaciones intensas, con el consecuente incremento del riesgo de inundaciones.

A lo largo de este siglo se espera una disminución del agua acumulada en los glaciares y en las cubiertas de nieve, lo que reduce la disponibilidad de agua en zonas abastecidas por estas fuentes en regiones montañosas donde vive más de una sexta parte de la población mundial.

En el caso de los ecosistemas su capacidad de resiliencia (capacidad de adaptación natural) se vería probablemente rebasada en muchos de ellos, durante este siglo debido a una combinación sin precedentes del cambio climático y las afectaciones asociadas (como inundaciones, sequías, fuegos forestales, proliferación de insectos y acidificación oceánica) y otros condicionantes del cambio global (como cambios en el uso de la tierra, contaminación y sobre-explotación de los recursos).

Es probable que aproximadamente 20-30% de las especies de plantas y animales estudiadas hasta el momento muestre un aumento del riesgo de extinción, si el incremento de la temperatura excede 1,5-2,5 °C.

También, dentro de ese intervalo de aumento de la temperatura se proyectan otras afectaciones a la biodiversidad y a los bienes y servicios que ofrecen los ecosistemas (como agua y alimentos), derivadas de cambios en la estructura y funciones de los ecosistemas. La progresiva acidificación de los océanos debido al incremento del dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera tendría impactos negativos sobre organismos marinos, como los corales, y otras especies dependientes de ellos.

Con respecto al sector alimentos, fibras y productos forestales, en las zonas tropicales, sobre todo en áreas secas, se espera una reducción de la productividad de los cultivos, incluso para pequeños incrementos locales de temperaturas (1-2 °C), lo que conduciría a incrementar el riesgo del hambre. Para las zonas ubicadas en latitudes medias y altas, se espera un ligero aumento de la productividad de los cultivos para niveles promedio de la temperatura local hasta 1-3 °C, dependiendo del cultivo; y para incrementos superiores de temperatura, la productividad de los cultivos disminuiría en algunas regiones. A escala global, la proyección indica que la producción potencial de alimentos aumente al incrementarse la temperatura promedio local de 1-3 °C; pero para temperaturas mayores se proyecta una disminución de la producción de alimentos. Con el incremento de la frecuencia de las sequías e inundaciones se espera una afectación negativa a la producción local de bienes de subsistencia, sobre todo en las latitudes bajas (zonas tropicales). También se esperan cambios regionales en la producción y distribución de ciertas especies de peces, debido al calentamiento continuado, con efectos adversos para la acuicultura y la pesca.

En los sistemas costeros y áreas de costas bajas se prevé un incremento en riesgos de erosión costera, debido al cambio climático y a la elevación del nivel del mar; así como un mayor deterioro de los corales. Un incremento de la temperatura superficial de los océanos de alrededor de 1-3 °C, resultaría en eventos más frecuentes de blanqueamiento y amplia mortalidad de corales, a menos que se produzca una adaptación térmica de los corales. Se prevé que los humedales costeros y manglares serían afectados negativamente por la elevación del nivel del mar. Se proyecta que millones de personas adicionales, serían afectadas por inundaciones cada año debido al incremento del nivel del mar en la década del 2080. Esta situación pone bajo riesgo especial a las áreas densamente pobladas y zonas de costas bajas donde la capacidad de adaptación es relativamente baja y que enfrentan otros retos como las tormentas tropicales. Las afectaciones serían mayores en los mega-deltas de Asia y África y las pequeñas islas son especialmente vulnerables.

Los efectos netos del cambio climático sobre la industria los asentamientos y la sociedad serían más negativos mientras mayor sea el cambio en el clima. Las industrias, asentamientos y comunidades más vulnerables son aquellas estrechamente vinculadas a recursos sensibles al cambio climático; sobre todo aquellos ubicados en áreas expuestas a eventos climáticos extremos. Las comunidades pobres, sobre todo aquellas concentradas en áreas de alto riesgo, son especialmente vulnerables y tienen una capacidad de adaptación muy limitada frente a los eventos climáticos extremos.

Es probable que por el cambio climático se vea afectada la salud de millones de personas, específicamente las personas que poseen capacidad de adaptación baja, mediante:

- Aumento de la malnutrición y sus consiguientes trastornos, con implicaciones para el desarrollo y crecimiento de los niños.
- Aumento de muertes, enfermedades y lesiones a consecuencia de las olas de calor, inundaciones, tormentas, incendios y sequías.
- Aumento de la carga de las enfermedades diarreicas.
- Aumento de la frecuencia de enfermedades cardiorrespiratorias ocasionadas por mayores concentraciones de ozono a nivel del suelo debidas al cambio climático.

- Modificación de la distribución espacial de algunos vectores de enfermedades infecciosas.
- También se esperan algunos efectos mezclados como la disminución o aumento de la tasa y del potencial de transmisión del paludismo en África.

Aunque algunos estudios en zonas templadas muestran que el cambio climático proporciona algunos beneficios, como la reducción de muertes por exposición al frío, en general, se prevé que los efectos negativos en la salud provocados por el aumento de la temperatura a nivel mundial, principalmente en los llamados países en desarrollo, superen los beneficios. El equilibrio entre impactos positivos y negativos en la salud humana variará de un lugar a otro y se modificarán en el tiempo, a medida que continúe el aumento de las temperaturas. De importancia crítica son los factores que conforman directamente la salud de las poblaciones, como educación, asistencia sanitaria, iniciativas e infraestructuras de salud pública y desarrollo económico.

Impactos del cambio climático en los pequeños estados insulares

La Convención de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y el Desarrollo en Río de Janeiro reconoció que los pequeños estados insulares en desarrollo (donde está incluida Cuba) en su conjunto son un caso especial, tanto para el medio ambiente como para el desarrollo sostenible.

Los pequeños estados insulares tienen características que los hacen especialmente vulnerables a los efectos del cambio climático, el incremento del nivel del mar y los eventos extremos. Entre estas características se destacan (UNFCCC, 2005): recursos naturales generalmente limitados; concentración de la población, actividades socioeconómicas y la infraestructura a lo largo de la zona costera; alta susceptibilidad a ciclones tropicales más frecuentes e intensos así como la surgencia de tormenta asociada; dependencia de recursos de agua dulce que son altamente sensibles a los cambios del nivel del mar; relativo aislamiento y a grandes distancias de los grandes mercados, con la consiguiente pérdida de competitividad en el comercio; economías extremadamente abiertas; alta densidad de población; inadecuada infraestructura en la mayoría de los sectores; su limitado tamaño físico elimina efectivamente algunas opciones de adaptación a los incrementos del nivel del mar.

Según el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (2007b) se proyectan los siguientes impactos del cambio climático en el territorio de los pequeños estados insulares:

- Se espera que el incremento del nivel del mar agrave las inundaciones, las surgencias, la erosión y otros peligros costeros, poniendo en peligro la infraestructura vital que sostiene el bienestar socioeconómico de las comunidades insulares. Algunos estudios indican que el aumento del nivel del mar puede ocasionar la pérdida de tierra e inundaciones costeras, mientras otros apuntan que algunos territorios insulares son morfológicamente resistentes y se prevé que se mantengan. En los territorios insulares del Pacífico y el Caribe más de 50% de la población vive a una distancia de la costa de 1,5 km. Casi sin excepción, los puertos y aeropuertos, las principales arterias viales, las redes de comunicación, las instalaciones y otras infraestructuras clave en los pequeños territorios insulares de los Océanos Índico y Pacífico suelen estar situadas en las zonas costeras.
- Es probable que los recursos hídricos en los pequeños territorios insulares estén gravemente en peligro. La mayoría de los pequeños territorios insulares disponen de poca agua. Muchos de los que están en el Mar Caribe y el Océano Pacífico padecerán un aumento del estrés hídrico a raíz del cambio climático.
- Es posible que el cambio climático tenga efectos graves en los arrecifes de coral, las pesquerías y

otros recursos marinos. El aumento de las temperaturas superficiales marinas, la elevación del nivel del mar, unas aguas más turbias, la carga de nutrientes, la contaminación química, los daños producidos por ciclones tropicales y la disminución en las tasas de crecimiento a raíz de los efectos de una mayor concentración de CO₂ en la composición química de los océanos, ocasionarán la decoloración y mortalidad de los corales.

- Se prevé que el cambio climático afecte adversamente a la agricultura comercial y de subsistencia en los pequeños territorios insulares. El aumento del nivel del mar, las inundaciones, la intrusión de agua del mar en depósitos de agua dulce, la salinización de los suelos y la falta de agua provocarían un impacto adverso en la agricultura costera. Lejos de las costas, se prevé que los cambios en los fenómenos extremos (por ejemplo, las inundaciones y sequías) tengan un efecto negativo en la producción agrícola.
- Es probable que tenga impactos de naturaleza adversa en la salud. Es viable que el aumento de las temperaturas y la disminución de la disponibilidad de agua a raíz del cambio climático incrementen el peso de las enfermedades infecciosas y diarreicas en algunos de los pequeños territorios insulares.
- Posiblemente los efectos del cambio climático en el turismo sean directos e indirectos y mayormente negativos. El turismo es la fuente principal del PIB y del empleo en la mayoría de los pequeños territorios insulares. Es probable que la elevación del nivel del mar y el aumento de la temperatura de las aguas marinas contribuya a acelerar la erosión de las playas, así como degradar y decolorar los arrecifes de coral. La pérdida del patrimonio cultural a raíz de inundaciones y crecidas reducirá el valor del ocio de los usuarios de las costas. Se espera que el cambio climático tenga impactos significativos a la hora de seleccionar los destinos turísticos. Un clima más cálido puede reducir la cantidad de personas que visitan los pequeños territorios insulares en latitudes bajas, pero a su vez tener el efecto contrario en territorios insulares de latitudes medias y altas.

ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN. COMPONENTES BÁSICOS DE LAS RESPUESTAS FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Las estrategias de respuesta fundamentales en la lucha frente al cambio climático son la mitigación y la adaptación.

Adaptación ante el cambio climático. Concepto y necesidad de la adaptación

En el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC³¹ la adaptación se define como «iniciativas y medidas encaminadas a reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos ante los efectos reales o esperados de un cambio climático».

La adaptación será necesaria para hacer frente a los impactos del cambio climático que resulten inevitables debido a las emisiones pasadas.

Tipos de adaptación

La adaptación puede ser preventiva (proactiva) o reactiva; autónoma (espontánea) o planificada; privada o pública³².

La adaptación preventiva o proactiva tiene lugar antes de que se observen los efectos del cambio climático y responden a la necesidad de adoptar acciones oportunas para reducir, al mínimo posible, las pérdidas humanas y materiales derivadas del cambio climático.

En contraste con lo anterior, la adaptación reactiva está encaminada a hacer frente a los impactos, luego de que estos se han producido, por lo que suele ser mucho más costosa que la adaptación proactiva.

La adaptación espontánea o autónoma es aquella que no constituye una respuesta consciente a los estímulos climáticos, y puede estar condicionada por cambios naturales, alteraciones del mercado u objetivos relacionados con el bienestar de los sistemas humanos. Por su parte, la adaptación planificada resulta de una decisión expresa en un marco de políticas, basada en el reconocimiento de que las condiciones han cambiado o están próximas a cambiar y que es necesario adoptar medidas para retornar a un estado deseado, para mantenerlo o para alcanzarlo. La adaptación planificada supone, como su nombre lo indica, la adopción de una secuencia de acciones planificadas, con objetivos y presupuestos previamente definidos.

En función de los agentes involucrados en las medidas o programas adoptados, la adaptación puede ser privada o pública. La adaptación privada es aquella emprendida, fundamentalmente, por individuos o agentes privados (como empresas), y por lo general, persigue fines más individuales que colectivos, relacionados con la necesidad de minimizar las pérdidas en el patrimonio o la reducción de las ganancias de los entes involucrados. Por su parte, la adaptación pública, está referida a las medidas y programas llevados a cabo por entes públicos, y por lo general están en función de intereses sociales más amplios.

Como todos los sectores socioeconómicos son vulnerables, en mayor o menor medida al cambio climático (IPCCb), las acciones de adaptación involucran a uno o varios de ellos. Entre los ejemplos de adaptación están: el aumento del ahorro y conservación del agua dulce; el mejor manejo de los suelos agrícolas; la sustitución de especies de plantas sensibles a las altas temperaturas por especies más resistentes; la conservación y mejoramiento de las barreras naturales de las zonas costeras (como los manglares); la protección de la infraestructura y asentamientos humanos situados cerca de la línea de costas o al margen de grandes ríos (ej. construcción de diques fluviales o costeros); el control epidemiológico para enfrentar enfermedades que proliferan en condiciones de altas temperaturas, como aquellas transmitidas por vectores (ej. dengue y malaria), u otras como las relacionadas con la calidad del agua (ej. enfermedades diarreicas); la diversificación y protección de la infraestructura turística; la protección y cambio de diseño en la infraestructura de transporte; y la promoción de la diversificación energética.

Capacidad de adaptación

La capacidad de adaptación de las distintas regiones, países y localidades está íntimamente relacionada con el grado de desarrollo socioeconómico y, consecuentemente, está desigualmente distribuida entre las sociedades y al interior de estas.

A escala regional, existen marcadas diferencias en cuanto a la capacidad de adaptación, ya que las regiones más débiles económicamente suelen ser las más vulnerables. Como es el caso de las zonas áridas y los mega-deltas ubicados en países subdesarrollados.

Aunque las sociedades desarrolladas son vulnerables al cambio climático, a la variabilidad climática y a los eventos extremos, su capacidad de adaptación es mucho mayor que la de las áreas subdesarrolladas. Sin embargo, los pobres que radican en países desarrollados también son muy vulnerables al cambio climático, lo que se puso de manifiesto durante la ola de calor que recorrió Europa en el 2003, y el huracán Katrina en Nueva Orleans, EE.UU. en el 2005.

Mitigación del cambio climático. Concepto y necesidad de la mitigación

El Cuarto Informe de Evaluación del IPCC³³ define la mitigación como los «cambios o reemplazos tecnológicos que reducen el insumo de recursos y las emisiones por unidad de producción (...), es la aplicación de políticas destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a potenciar sus sumideros».

La mitigación constituye un elemento clave de las respuestas ante el cambio climático, ya que contribuye a reducir, retrasar o evitar muchos de los impactos (ver IPCC, 2007c). La ausencia de mitigación pudiera implicar que, a largo plazo, el cambio climático exceda la capacidad de los sistemas naturales, manejados y humanos para adaptarse.

Mientras mayor y más rápida sea la reducción de emisiones, menor y más lento sería el calentamiento proyectado. Con acciones de mitigación oportunas se podría reducir el cambio climático y los costos de adaptación.

Potencial de mitigación

Los estudios especializados acerca de este tema identifican distintos potenciales de mitigación, como el potencial teórico, el técnico, el económico y el de mercado³⁴.

El potencial teórico se refiere al límite superior teórico (termodinámico) de la mitigación. El potencial técnico, está determinado por la aplicación de una tecnología o práctica que ya ha sido probada para la reducción de las emisiones netas de gases de efecto invernadero. Este potencial no considera las restricciones económicas o financieras para acceder y aplicar las tecnologías, ni otras restricciones económicas o de mercado.

El potencial económico es el que resulta económicamente rentable en un contexto determinado, aunque en la práctica una parte de este potencial no se puede realizar debido a la existencia de restricciones u obstáculos diversos, como son las barreras al flujo de información acerca de las ventajas de determinadas tecnologías o prácticas de mitigación, falta de apoyo a pequeñas y medianas empresas para utilizar estas tecnologías o prácticas.

El potencial de mercado es el que se puede lograr en las condiciones de mercado previstas en un determinado contexto socioeconómico y teniendo en cuenta las diversas barreras económicas, sociales, culturales, políticas u otras que existen en el lugar que se trate.

A partir de las definiciones anteriores se puede concluir que el potencial teórico es mayor que el potencial técnico; este último resulta superior al económico y a su vez suele superar al potencial de mercado. En torno a este tema se mantiene un intenso debate entre los expertos en mitigación, que buscan perfeccionar las definiciones anteriores a tono con los resultados de las nuevas investigaciones acerca de las potencialidades y limitaciones para mitigar el cambio climático.

Como se destaca en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (2007c), las fuerzas del mercado, por sí solas, no conducirían a reducciones de emisiones significativas. Existe una amplia variedad de políticas e instrumentos a disponibilidad de los gobiernos para estimular la mitigación; pero su aplicabilidad depende de las circunstancias nacionales y del contexto sectorial.

Costos y beneficios de la mitigación

De acuerdo con estudios especializados recientes, como la Contribución del Grupo de Trabajo III del IPCC a la Cuarta evaluación de esa institución (IPCC, 2007c), existe un potencial económico significativo para la mitigación de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. También se destaca que las acciones de mitigación pueden generar co-beneficios de corto plazo, como mejoras en la salud debido a la reducción de la contaminación del aire, y esto puede compensar una parte significativa de los costos de mitigación.

Por su parte el Informe Stern (2006), dedicado a estudiar la economía del cambio climático, destaca que los costos futuros del calentamiento global, en ausencia de medidas de mitigación suficientes, se podrían situar entre 5% y 20% del PIB anual mundial. Sin embargo, este nivel de pérdidas se podría evitar incurriendo en costos anuales de mitigación relativamente bajos, alrededor de 1% del PIB.

Opciones de mitigación

El IPCC (2007c) señala que ningún sector o tecnología, por sí solo, puede asumir todo el reto de la mitigación, pero destaca las grandes potencialidades de mitigación que ofrece el sector de la producción de energía, sobre todo si se considera que las inversiones en infraestructura energética totalizarían más de 20 millones de millones de dólares hasta 2030. También se enfatiza que resulta más efectivo invertir en el mejoramiento de la eficiencia energética de los usos finales, que en el incremento de la oferta energética.

Entre las opciones de mitigación más difundidas se ubican aquellas referidas a la reducción de emisiones en las fuentes fijas (ej. una planta industrial) o móviles (ej. autos u otros medios de transporte) y la ampliación de sumideros de emisiones (ej. mediante la reforestación). Como resultado combinado de estas dos opciones básicas, tienden a disminuir las emisiones netas de gases de efecto invernadero.

Además, existen otras prácticas en el contexto de la mitigación que están siendo objeto de un intenso debate en el presente, acerca de sus ventajas, limitaciones e impactos adversos. En este sentido se destaca la captura y almacenamiento de carbono en depósitos subterráneos u oceánicos, el manejo de las radiaciones y otras opciones de geoingeniería.

Se debe tener en cuenta que las acciones de mitigación orientadas a reducir las emisiones en las fuentes, suelen ser las más efectivas para combatir el cambio climático, en tanto atacan el problema en su raíz, en su génesis, y por tanto este tipo de acciones deben ocupar un lugar prioritario dentro del menú de opciones de la mitigación. En esta dirección se ubican los esfuerzos dirigidos a promover el ahorro y uso eficiente de la energía; y el fomento de las fuentes renovables de energía.

Capacidad de mitigación

Al igual que la capacidad de adaptación, la de mitigación está desigualmente distribuida entre las regiones, países y al interior de las sociedades, en función del grado de desarrollo socioeconómico.

Además la capacidad de mitigación depende de la dotación de recursos energéticos de cada región o país, los tipos de recursos que resultan más abundantes en el contexto que se trate (combustibles fósiles, recursos renovables) y las opciones de cooperación energética en las que se pueda insertar ese país o región.

Estrategias de respuesta ante el cambio climático. Lecciones para la acción

Aunque persiste incertidumbre en los estudios, proyecciones y mediciones del cambio climático y sus efectos, la comunidad científica internacional reconoce que debe prevalecer el principio precautorio en el diseño de estrategias de respuesta ante este problema ambiental. Es decir, se debe actuar oportunamente para evitar las consecuencias negativas que podrían desencadenarse y hay que crear condiciones para la adaptación ante aquellos impactos que ya se están produciendo o se podrían producir en un futuro próximo.

Además, este enfoque debe partir del reconocimiento de los niveles de responsabilidad histórica de los distintos grupos de países con el cambio climático y sus consecuencias. Mientras los países industrializados son los principales responsables de las concentraciones de gases de efecto invernadero, sobre todo desde una perspectiva histórica; los países subdesarrollados son los más vulnerables, en particular los pequeños estados insulares y los llamados países menos adelantados (PMA).

La mayoría de los gases de efecto invernadero tienen una larga permanencia en la atmósfera (más de 100 años en algunos casos), de modo que no sólo se trata de analizar la contribución actual de los países industrializados al calentamiento global, sino además los efectos acumulados de estas emisiones, lo que evidencia la necesidad de examinar la deuda ecológica

de estos países con la humanidad desde una perspectiva histórica. Estos países deben liderar los esfuerzos multilaterales en materia de reducción de emisiones, así como el aporte de tecnologías idóneas y financiamiento al mundo subdesarrollado.

A la hora de diseñar estrategias de respuesta ante el cambio climático, también se debe tener en cuenta el vínculo existente entre este fenómeno y otros problemas ambientales globales, como el agotamiento de la capa de ozono, la pérdida de biodiversidad biológica, la desertificación y la deforestación. De esta forma, se evitaría que las medidas que se adopten para enfrentar al cambio climático agraven otros problemas ambientales y viceversa, con lo que se contribuiría a soluciones más integrales y sostenibles.

Las estrategias de respuesta ante el cambio climático, deben considerar, además, la inercia de los sistemas climático, ecológico y socioeconómico, así como el carácter irreversible de las interacciones entre estos sistemas, lo que refuerza la importancia de acciones preventivas en materia de adaptación y mitigación.

Hay que señalar que la adaptación no evitaría todos los daños, pero se necesitarían todas las escalas para complementar a la mitigación. Ni la adaptación, ni la mitigación, por sí solas, pueden evitar todos los impactos significativos del cambio climático; sin embargo, se pueden complementar mutuamente y de conjunto pueden reducir significativamente los riesgos del cambio climático (IPCC 2007d).

En ambos casos, tanto para la mitigación como para la adaptación, se impone la necesidad de superar las barreras que impiden avanzar con más celeridad; y dar prioridad a un enfoque integral que vincule el desarrollo con la equidad y la sostenibilidad.

Las opciones de respuesta ante el cambio climático se deben aplicar de manera que favorezcan las sinergias y eviten los conflictos con otras dimensiones del desarrollo sostenible. Este enfoque integral ha quedado expresado en los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), en particular en el objetivo 7, que busca garantizar la sostenibilidad ambiental.

La capacidad de adaptación y mitigación es dinámica y está condicionada por un conjunto de factores como el monto del ingreso per cápita, los mecanismos de distribución de la riqueza nacional y los niveles de equidad, el acceso a tecnologías ambientalmente idóneas, los activos físicos disponibles, la dotación de recursos naturales, los recursos humanos e instituciones, las redes sociales, la gobernabilidad, y la voluntad política.

La capacidad de adaptación y mitigación en los países subdesarrollados es muy limitada debido a las restricciones socioeconómicas y financieras, la brecha tecnológica y otros impactos adversos de la globalización neoliberal. Esta situación se ha tornado particularmente grave en los años más recientes, sobre todo desde mediados de 2008, debido a los efectos de la crisis económica global. Para apoyar la capacidad de respuesta de estos países se requieren flujos financieros nuevos y adicionales, mecanismos que garanticen la transferencia de tecnologías idóneas y el desarrollo de una capacidad tecnológica endógena.

Sin bien, la ciencia del cambio climático ha evolucionado con gran rapidez en las últimas décadas, el progreso en términos de estrategias de respuesta ante este desafío global es todavía lento, tímido y fragmentado. La comunidad internacional aún carece de un marco multilateral de largo plazo frente al cambio climático, que sea aceptado por todas las partes como un proceso coherente y efectivo, con umbrales y metas bien definidos.

CAMBIO CLIMÁTICO, ECONOMÍA Y SOCIEDAD

Los estudios especializados más recientes sobre el cambio climático revelan los elevados costos económicos y las muy adversas implicaciones socio-ambientales que se derivarían de la no acción o lentitud de los tomadores de decisiones en este campo.

El debate más reciente acerca del cambio climático y los esfuerzos globales para enfrentarlo han coincidi-

do con el agravamiento de la situación socioeconómica mundial debido al impacto de la crisis económica global, que desde mediados del 2008 se ha dejado sentir con particular crudeza en sus múltiples dimensiones: financiera, comercial, social, alimentaria, ambiental.

De acuerdo con el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, el calentamiento del sistema climático es inequívoco, y se explica por el marcado incremento de las concentraciones atmosféricas globales de gases de efecto invernadero -como dióxido de carbono, metano y óxido nítrico- desde 1750, como resultado de las actividades humanas.

Tanto los informes del IPCC como otros estudios especializados revelan afectaciones derivadas del cambio climático para prácticamente todos los sectores socioeconómicos, con impactos preocupantes en áreas muy sensibles como la seguridad alimentaria. Los sectores y regiones más vulnerables son aquellos estrechamente vinculados a recursos sensibles al cambio climático; sobre todo los ubicados en áreas expuestas a eventos climáticos extremos (IPCC, 2007b).

El sector energético es responsable de más de la mitad del calentamiento global, debido al predominio de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) en el consumo de energía. Los combustibles fósiles representan cerca del 90% del consumo mundial de energía comercial (sólo el petróleo garantiza alrededor del 35%) y aportan alrededor de 80% de las emisiones de CO₂, que es el principal GEI. Consecuentemente, las medidas para el control del cambio climático se deben dirigir, fundamentalmente, a modificar los actuales patrones de producción y consumo de energía.

Las emisiones globales de GEI han crecido desde los tiempos pre-industriales, con un incremento del 70% entre 1970 y 2004, y de continuar las tendencias y las políticas actuales en relación con la mitigación, esas emisiones continuarán creciendo en las próximas décadas (IPCC, 2007c).

Existe un potencial económico significativo para la mitigación de las emisiones globales en un futuro próximo. El incremento de la eficiencia energética y el fomento del uso de las fuentes energéticas con bajo contenido de carbono, como las fuentes renovables, juegan un papel clave para lograr una estabilización de las concentraciones de GEI a niveles bajos.

En el análisis del cambio climático y los desequilibrios socioeconómicos globales, desde una perspectiva histórica, son de gran utilidad, de un lado, los estudios acerca de varios mecanismos de saqueo y dominación como la deuda externa de los países subdesarrollados, que ya alcanza un monto de 2,8 millones de millones de dólares, de otro lado, las deudas ecológicas, energéticas y climáticas del Norte industrializado.

Las deudas ecológicas, energéticas y climáticas tienen su base en los patrones de producción y consumo dilapidadores de recursos naturales -en particular de energía-, seguidos por los países industrializados a lo largo de su historia de desarrollo capitalista; y en los efectos de estos patrones de funcionamiento económico sobre el clima global. En este análisis, la relación acreedor-deudor se invierte, y los países altamente desarrollados pasan a ser los grandes deudores de la humanidad.

Gran parte del debate actual en torno al cambio climático se refiere a las negociaciones internacionales

relacionadas con la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Protocolo de Kyoto (PK). Una de las fortalezas de la Convención es el reconocimiento de las responsabilidades comunes pero diferenciadas de los Estados, es decir se reconoce que si bien el cambio climático es un reto global que concierne a todos en el planeta, los países industrializados, como principales emisores históricos de GEI, deben dar los primeros pasos para enfrentar este problema.

La internacionalización del debate sobre medio ambiente y desarrollo ha coincidido en el tiempo con el auge del discurso y las prácticas neoliberales a nivel mundial; y en estas condiciones se ha pretendido sobredimensionar la aplicación de fórmulas de mercado en la solución de problemas ambientales.

En el proceso futuro de negociaciones en torno al cambio climático, se debe tener en cuenta que en aquellos casos en que el móvil de las partes sea más comercial que ambiental, los resultados en materia de mitigación y adaptación al cambio climático serían desalentadores. Los criterios de mercado a ultranza, con una perspectiva de corto plazo, no resultan adecuados para enfrentar problemas como el cambio climático que requieren una perspectiva de análisis de largo plazo, que considere las prioridades socioeconómicas y ambientales de los países subdesarrollados.

La experiencia cubana aporta importantes lecciones en cuanto a las estrategias de respuesta frente al cambio climático. Ante todo, se destacan los resultados de la ciencia cubana en este campo, a partir del potencial científico creado en el país y la colaboración interinstitucional, lo que ha permitido a Cuba hacer valiosas contribuciones referentes a la adaptación y a la mitigación.

Cuba, como país insular, presenta un alto grado de exposición y vulnerabilidad ante los impactos del cambio climático; sin embargo, cuenta con una importante capacidad de adaptación en áreas como la preparación y alerta temprana ante desastres y eventos extremos como los huracanes intensos.

También se destacan los aportes de Cuba en materia de mitigación -sin ser un gran emisor de GEI-, como resultado de la Revolución Energética y los programas de reforestación; así como los resultados de la colaboración cubana con otros países subdesarrollados en la lucha frente al cambio climático.

El cambio climático es un reto global que requiere soluciones globales, pero equitativas. Las estrategias de respuesta ante el cambio climático, se deben insertar en las agendas de desarrollo y tener en cuenta la responsabilidad histórica de los distintos países.

Se trata de un desafío no solo ambiental, sino también social y económico y, por tanto, los esfuerzos para enfrentarlo, si son concebidos de forma integrada y equitativa, se pueden articular con las acciones efectivas para enfrentar la crisis económica global; no se deben ver como esfuerzos excluyentes.

NOTAS

¹ El término trabajo fue introducido por el científico-mecánico francés J. Poncelet en 1826.

² Enciclopedia Microsoft Encarta 2002.

³ Los términos energía cinética y energía potencial fueron establecidos por los científicos ingleses Sir William Thomson y Peter

Guthrie Tait (1831-1901) en su libro *A treatise on Natural Philosophy*, Oxford, 1867.

⁴ Engels, F.: *Dialéctica de la naturaleza*, Editora Política, La Habana, 1979, pp. 239-241.

⁵ Uno de los más abundantes es precisamente el CO₂, un producto de la combustión de los fósiles.

⁶ Y en primerísimo lugar al petróleo con sus derivados.

⁷ Blanco, Juan A.: *El tercer milenio*, Editorial del Centro Félix Varela, La Habana 1998.

⁸ Brunekreef B, Hoek G. (1993) The relationship between low level air pollution exposure and short term changes in lung function in dutch children. *JEAE*; 3 (Suppl 1):117-28.

⁹ Schindler C, Ackermann Liebrich U, Leuenberger P, Monn Ch. (1998) Associations between lung function and estimated average exposure to NO₂ in eight areas of Switzerland. *Epidemiology* 1998; 9(4):405-11.

¹⁰ World Health Organization, 1997, Health and environment in sustainable development. Five years after the Earth Summit, Executive summary, Geneva: WHO, 1997: 9-30.

¹¹ Molina E, Barceló C, Bonito L A, Puerto C. (1996) Factores de riesgo de cáncer pulmonar en Ciudad de La Habana. *Rev Cubana Hig Epidemiol*; 34(2):81-90.

¹² Organización Panamericana de la Salud. (2000) *La salud y el ambiente en el desarrollo sostenible*. Washington, D.C. OPS; (Publicación Científica No. 572).

¹³ Koren HS, 1995. Associations between Criteria Air Pollutants and Asthma. *Environmental Health Perspectives*; 103(6):235-42.

¹⁴ Ostro B., 1996, A methodology for estimating air pollution health effects. Geneva: WHO.

¹⁵ Goldsmith J, Abramson M, Friger M., 1996, Associations between health and air pollution in time series analyses, *Archives of Environmental Health*; 51(5): 359-67.

¹⁶ Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 2000, *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo-1999*. São Paulo: CETESB, 2000:13.

¹⁷ Muy probable: 90-99% de posibilidad de que el resultado sea verdadero.

¹⁸ 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. El factor dominante en el forzamiento radiativo del clima en la era industrial, es el incremento de las concentraciones atmosféricas de varios GEI de larga vida.

¹⁹ SAO: Sustancias Agotadoras del Ozono.

²⁰ Estos otros GEI no se incluyeron en la CMNUCC para no duplicar el esfuerzo para su control que ya se venía acometiendo en el Protocolo de Montreal sobre las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono.

²¹ Estos seis gases (o familias de gases) son los GEI incluidos en el Protocolo de Kyoto.

²² ppmv: Partes por millón por volumen.

²³ Período pre-industrial: Antes del año 1750.

²⁴ ppbv: Partes por billón por volumen.

²⁵ En esta clasificación de la CMNUCC las Partes N° Anexo I son mayormente países en desarrollo.

²⁶ EIT: Partes del Anexo I de la CMNUCC que son países con economías en transición (la Federación Rusa, los Estados Bálticos y varios países de Europa Central y del Este).

²⁷ Las emisiones brutas excluyen las emisiones y remociones de GEI derivadas del Uso, Cambio de Uso de la Tierra y la Silvicultura.

²⁸ El término «emisiones agregadas» implica que las emisiones de GEI son estimadas mediante una suma de las emisiones de cada GEI directo multiplicadas por el potencial de calentamiento global específico de cada GEI para un horizonte temporal de 100 años establecidos en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC (1 para el CO₂, 21 para el CH₄, 310 para el N₂O, 23900 para el SF₆ y valores específicos para cada gas incluido en los HFC y PFC).

²⁹ Glaciar-Masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (mediante deformación interna y deslizamiento de su base) condicionada por la topografía circundante (por ejemplo, las laderas de un valle, o la inmediatez de montañas). Un glaciar se mantiene gracias a la acumulación de nieve a grandes altitudes, compensada por la fusión en altitudes bajas o por la descarga vertida al mar.

³⁰ Permafrost-Terreno perennemente congelado que se forma cuando la temperatura se mantiene por debajo de cero grado Celsius.

³¹ Ver IPCC, 2007b y 2007d.

³² Ver IPCC, 2007b y 2007d.

³³ Ver IPCC, 2007c y 2007d.

³⁴ Ver IPCC, 2007c y 2007d.