



2

Colombia en el ambiente global

Autores:

José Daniel Pabón (Meteorología)
Profesor asistente, Departamento de Geografía,
Universidad Nacional de Colombia.

Rodrigo Chaparro (Química ambiental)
Profesor asistente, Departamento de Ingeniería
Química, Universidad Nacional de Colombia.

Con la colaboración de:

Eunice Ñañez, Beatriz Ponce, Gloria Edith Triana.

Los procesos físicos y químicos en el planeta Tierra transcurrieron de tal manera que después de millones de años apareció la vida. Más tarde, lo físico, lo químico y lo biológico propiciaron la evolución, que llevó a la formación de especies animales y vegetales, a la aparición del hombre y a su posterior organización en sociedades y, finalmente, al establecimiento de relaciones entre lo natural (físico, químico y biológico) y lo social. La infinidad de procesos y funciones en las esferas naturales y sociales y las interacciones entre estas esferas conforman lo que hoy se puede llamar el ecosistema planetario o ecosistema global.

Todos los fenómenos del acontecer colombiano están enmarcados dentro de los procesos del ambiente global: por un lado, están permanentemente influenciados por la parte global y por otro, éstos influyen en las escalas mayores. Por ello, al estudiar el ambiente nacional es conveniente conocer qué es el ambiente global, cuáles son los procesos básicos que se desarrollan en él y qué fenómenos están ocurriendo en la actualidad.

El ambiente global

Formación del ecosistema global

Las interacciones físicas y químicas que se desarrollaron en el microcosmos dentro del planeta Tierra, a partir de su misma formación, propiciaron la aparición de la vida y de la esfera biológica.

Inicialmente, enormes cantidades de vapor de agua, anhídrido carbónico y metano, por efecto de la gravedad quedaron alrededor de la corteza sólida formando la atmósfera primitiva y el plegamiento de la corteza fue dándole origen a las montañas. Posteriormente, la condensación del vapor de agua y el fenómeno de precipitación llevaron a la ocupación de las depresiones, lo que, a su vez, dio origen a los océanos, mares, lagos y ríos. Los procesos de meteorización de los elementos naturales sobre la corteza continental, el volcanismo, entre otros, fueron formando de manera simultánea el suelo.

Hacia finales de la era Arcaica (hace unos 600 millones de años) aparecen las primeras formas de vida en el océano: las bacterias y las algas azules. Estos organismos fueron evolucionando y formando organismos superiores, como las primeras plantas terrestres (hace unos 400 millones de años), los vertebrados, las angiospermas (plantas más evolucionadas), los dinosaurios (desde hace 225 millones de años hasta hace 65 millones de años), los primeros mamíferos primitivos (desde hace 65 mi-

llones hasta hace dos millones de años), y así sucesivamente hasta llegar a la aparición del hombre durante los últimos dos millones de años.

Desde el *Homo habilis* (que vivió hace dos millones de años), pasando por el *Homo erectus* (1.6 millones de años), el proceso evolutivo del hombre llegó al *Homo sapiens*, cuya existencia en Europa, norte de África y Asia se remonta entre 100.000 y 35.000 años. Ya por esta época, las primeras comunidades de humanos –pueblos nómadas de pescadores y cazadores– interactuaban con el ambiente circundante. Más tarde, hace unos 12.000 años, se empiezan a organizar las primeras sedes de población: el hombre se va volviendo sedentario e inicia nuevas actividades, la agricultura y la ganadería. Las poblaciones se fueron expandiendo y se organizaron en regiones donde las condiciones ambientales (clima, fauna, flora) eran más propicias o permitían su desarrollo. Durante un largo periodo se forman las primeras civilizaciones y se desarrollan actividades como la metalurgia y la industria, nuevas formas de interacción del hombre con el medio biofísico. Un hecho destacado en la historia de las relaciones sociedad-naturaleza es la revolución industrial a finales del siglo XVIII, cuando se inicia una nueva forma de interacción de materia y energía con mayor intensidad de los flujos de algunos elementos hacia la atmósfera.

La aparición del hombre, el crecimiento de la población, el progreso científico y tecnológico y la expansión socioeconómica llevaron a la formación de una nueva esfera del ecosistema planetario: la antroposfera. Los procesos que en ella se desarrollan, y la interacción con las demás esferas juegan un papel importante en la dinámica del ecosistema global actual.

El ambiente global actual

En la actualidad, el ambiente global está conformado por las siguientes esferas: la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera, la biosfera y la antroposfera.

La atmósfera es la capa gaseosa que cubre el planeta.

La hidrosfera comprende el agua en sus diferentes estados (sólido, líquido y gaseoso), que se encuentra en los océanos, las aguas continentales (ríos, lagos, etc.) y en la criosfera (casquetes polares, glaciares de montaña, nieves estacionales).

La litosfera incluye el suelo, la corteza terrestre y parte del manto superior.

La biosfera está constituida por todos los organismos vivos.

La antroposfera incluye todas las formas de actividad, de relaciones y de funciones dentro de la sociedad humana.

Las diferentes esferas son depósitos de masa en diferentes estados y de diversas formas de energía. A través del tiempo, y gracias a la interacción entre las esferas, las proporciones de masa y energía en cada una de ellas varían. Este intercambio de masa y energía es continuo y se lleva a cabo en forma de ciclos que cruzan las esferas. Estos ciclos se les conoce como ciclos biogeoquímicos.

El motor principal de la dinámica del ecosistema planetario es la energía solar. La dinámica de ésta se pone de manifiesto a través de procesos de intercambio de masa y energía entre las diversas esferas componentes del sistema global.

El incremento o la disminución de la masa de un componente de alguna de las esferas o de su energía produce cambios en todo el ecosistema global. Estos cambios, que han ocurrido en el pasado y ocurrirán en el futuro, se conocen como cambios globales. En el presente estos cambios están siendo acelerados por procesos y transformaciones importantes de la antroposfera.

En el ecosistema planetario es posible identificar subsistemas, como el sistema climático, el sistema productivo, etc. Esta subdivisión es utilizada generalmente para el estudio parcial de un elemento, un proceso o alguna esfera del sistema global.

La energía solar

La energía proveniente del Sol, en medio de otras formas de energía (gravitacional, por ejemplo) disponibles en el sistema global, es el impulso inicial que, directamente o transformada, genera la dinámica del ecosistema planetario. La energía solar es el motor de la dinámica de la atmósfera, del océano, del clima y de la biosfera, y es un factor esencial dentro de los ciclos biogeoquímicos en general.

La energía solar, por ejemplo, al llegar a la superficie terrestre es absorbida y convertida en calor (energía interna). Por la heterogeneidad de las propiedades de absorción de la superficie, su calentamiento es diferenciado, lo que conlleva el movimiento en la atmósfera y en el océano. De otra parte, al calentar la superficie del océano (o de un lago o un río) se genera el proceso de evaporación que estimula el intercambio de agua (masa) y calor (energía) entre la atmósfera y la hidrosfera, participando de manera importante en el ciclo hidrológico.

Igualmente, la energía solar es esencial en el proceso de fotosíntesis, por el cual el dióxido de carbono, el agua y los nutrientes inorgánicos forman sistemas orgánicos, como las plantas. A través de este proceso se realizan las fases del

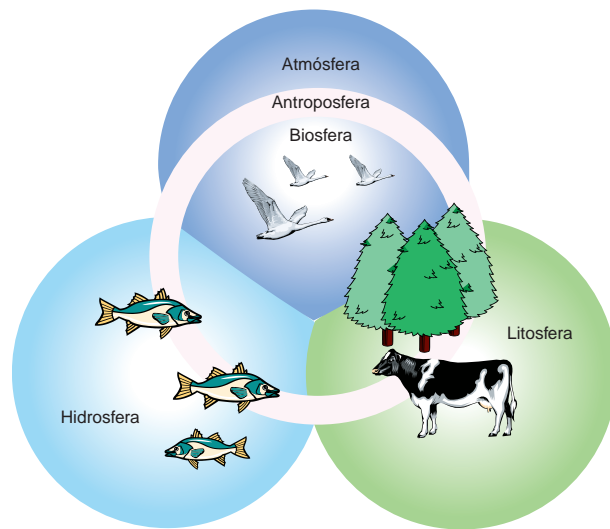


Figura 2.1. Representación esquemática de las esferas componentes del sistema global. (Adaptada de Mackenzie y Mackenzie, 1995)

ciclo del carbono y del agua entre la atmósfera y la biosfera, y del ciclo de nutrientes entre la litosfera y la biosfera.

A medida que fue evolucionando el ecosistema global, fueron apareciendo en la escena de la dinámica del sistema planetario diferentes formas de energía, además de la energía solar. Así, con la conformación de la biosfera (plantas y animales) aparece la bioenergía, que da la capacidad a los seres vivos (en especial, a los animales) de realizar un trabajo. La posterior evolución, la formación de la antroposfera y la identificación por parte de ésta de fuentes de energía (eléctrica, nuclear, etc.) dentro del sistema global, condujeron a un cambio en la dinámica del intercambio de masa y energía entre las diferentes esferas y, por ende, a un cambio en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos.

Los ciclos biogeoquímicos

Las esferas que conforman el ambiente global están constituidas por diferentes elementos químicos, indispensables para la vida y el funcionamiento del ecosistema planetario. La atmósfera es fundamentalmente nitrógeno y oxígeno; la hidrosfera, hidrógeno y oxígeno; la litosfera, silicio, oxígeno, carbono, aluminio, hierro y nitrógeno, y la biosfera, carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. Existen otros elementos que no están presentes en grandes cantidades en las diferentes esferas, pero que son fundamentales para el sostenimiento de la vida, entre ellos el fósforo, el azufre y el potasio.

Estos elementos se intercambian continuamente entre las esferas donde están depositados en diversos estados (sólido, líquido o gaseoso) y como compuestos. Este proceso de intercambio, necesario para el funcionamiento del sistema en general y constituyente esencial de su dinámica, se denomina ciclos biogeoquímicos. En algunos casos se citan como ciclos de gases y nutrientes.

En esta sección se ilustra la forma como se desarrollan estos importantes ciclos naturales.

El ciclo del oxígeno

El oxígeno es un elemento esencial para el desarrollo de los seres vivos y el funcionamiento del sistema global en general. Este elemento constituye 20% de la atmósfera, donde se encuentra como un compuesto diatómico (O_2) y triatómico (O_3), en el vapor de agua (H_2O), en el dióxido de carbono (CO_2) y en otros gases; en la biosfera está presente en la materia orgánica; en la hidrosfera es componente del agua y se presenta también como oxígeno disuelto; en la litosfera forma parte de la materia orgánica del suelo; en la antroposfera está almacenado en diferentes elementos de la actividad humana, como los procesos industriales, entre otros.

El proceso de intercambio de oxígeno entre las diversas esferas del sistema se desarrolla en diferentes escalas de tiempo: el intercambio entre la atmósfera, la biosfera y la hidrosfera se lleva a cabo en escalas de tiempo cortas: días y estaciones. Durante la fotosíntesis, las plantas toman el CO_2 y en la incorporación del carbón a los tejidos se libera el oxígeno a la atmósfera. En el océano, los procesos relacionados con el crecimiento del fitoplancton liberan oxígeno a la atmósfera.

El ciclo del carbono

El carbón compone aproximadamente 50% de los tejidos de los organismos vivos y, en forma de dióxido de carbono, se constituye en elemento esencial para el crecimiento de las plantas. El carbono, también como dióxido de carbono, juega un papel importante en la regulación del clima del planeta. Este elemento se encuentra depositado en todas las esferas del sistema global en diferentes formas: en la atmósfera, como dióxido de carbono, metano y otros componentes; en la hidrosfera, en forma de dióxido de carbono disuelto en el agua; en la litosfera, en las rocas y en depósitos de carbón, petróleo y gas; en la biosfera, en los carbohidratos, y en la antroposfera, en diferentes formas en los objetos creados por la sociedad.

El carbono circula entre la atmósfera, la hidrosfera, la biosfera y la litosfera por medio de procesos de interacción

en escalas de tiempo que van desde procesos que demoran algunas horas, días, meses y estaciones hasta aquéllos que tardan largos periodos geológicos. Los mayores flujos de intercambio natural tienen lugar entre la atmósfera y la biota terrestre y entre la atmósfera y las aguas superficiales de los océanos.

El carbono lo incorporan los organismos autótrofos a las cadenas alimenticias a través de procesos de síntesis, produciendo una gran cantidad de compuestos orgánicos, como carbohidratos, aminoácidos y vitaminas. Las plantas absorben el carbono en forma de gas carbónico de la atmósfera, mientras que los organismos fotosintéticos acuáticos lo absorben como ion bicarbonato.

Los animales, a través de la ingestión de plantas u otros animales, incluyen carbono en su organismo y, a través de la respiración, lo regresan a la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO_2).

Los océanos capturan en grandes áreas carbono de la atmósfera mediante diferentes procesos. Por un lado, absorben CO_2 y lo transforman en carbonato de calcio ($CaCO_3$), mientras que en los procesos de respiración del fitoplancton marino, el carbono se fija en éste, el que al descomponerse va al fondo del océano como lluvia de detritos. Sin embargo, existen algunas áreas de los océanos donde se libera carbono a la atmósfera en forma de CO_2 .

Los cadáveres y los residuos de animales y vegetales alimentan a los organismos descomponedores, que devuelven parte del carbono al medio en forma de gas carbónico y metano. En ciertas condiciones, estos residuos se incorporan al suelo al transformarse en humus o, en periodos más largos, en compuestos como el carbón y el petróleo. Estos combustibles, al ser utilizados para la generación de energía, regresan nuevamente el carbono a la atmósfera en forma de dióxido de carbono.

En la atmósfera el CO_2 representa menos de 0,3%. Esta cantidad, sumada al CO_2 disuelto en el agua, proporciona el carbono necesario para la elaboración de la materia orgánica de los seres vivos del ecosistema planetario.

Durante la historia del planeta, el ciclo del carbono ha presentado cambios en la dinámica de alguna de sus fases. En la atmósfera primitiva, el CO_2 tenía una concentración mayor; la aparición de la vegetación y la captura del CO_2 asociada a ésta, depositó grandes cantidades de carbono en la biosfera. Actualmente, los procesos en la antroposfera están acelerando el paso del carbono desde algunas esferas (litosfera y biosfera, principalmente) a la atmósfera, a donde llega en forma de CO_2 . De esta manera se está aumentando la concentración de CO_2 en la atmósfera, lo cual llevará a una readaptación del sistema global a las nuevas condiciones.

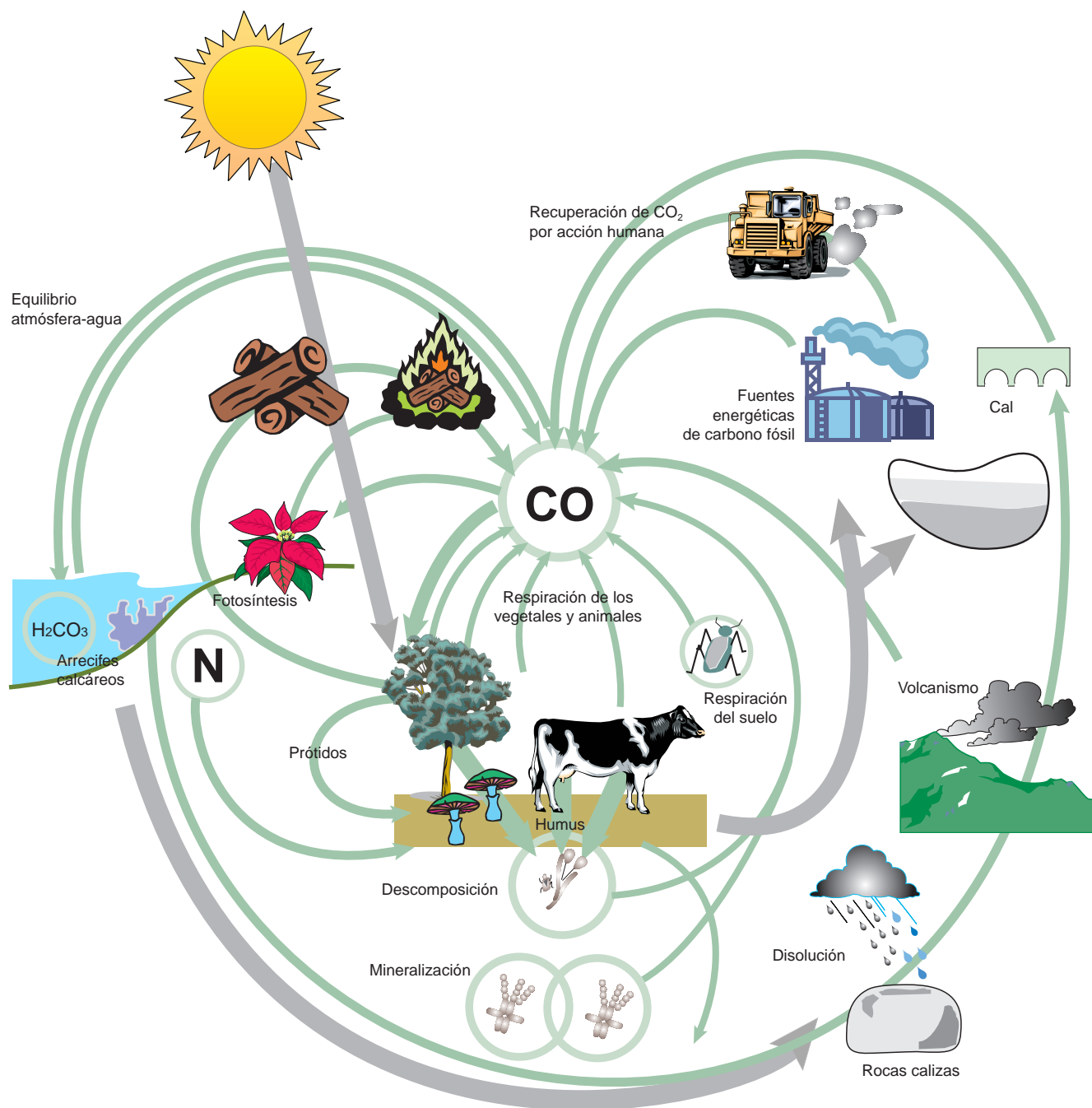


Figura 2.2. El ciclo del carbono. (Tomado de Duvigneaud, 1978)

En los últimos dos siglos, los procesos que se desarrollan en la antroposfera agregaron un componente más al ciclo del nitrógeno: la combustión artificial propicia el paso del nitrógeno desde la biosfera y la litosfera a la atmósfera en forma de N_2O . De la misma manera, la descomposición de los fertilizantes compuestos de nitrógeno libera N_2O a la atmósfera.

El N_2O es un gas con efecto invernadero y su incremento en la atmósfera a través de estos nuevos procesos está causando cambios en el sistema global.

El ciclo del fósforo

El fósforo es un constituyente esencial del protoplasma, de los nucleótidos, de los ácidos nucleicos y, por ende, de los seres vivos. Este elemento se encuentra en los tejidos y huesos de los organismos (o sea, en la biosfera), como fosfatos (PO_4^{-3}), y en la corteza terrestre (litosfera).

A diferencia del oxígeno, el carbono, el nitrógeno y el azufre, el fósforo no se encuentra en forma gaseosa. Por ello, el fósforo no está disponible en la atmósfera, sino que existe en pequeñas cantidades en la corteza terrestre.

El mayor reservorio de fósforo son las rocas contenedoras de fosfatos formadas durante eras geológicas pasadas. Dichos depósitos se han ido erosionando gradualmente por la lluvia, liberando de esta forma los fosfatos para que sean consumidos por las plantas. Una vez en las plantas, el fósforo pasa a los animales cuando éstos las ingieren como alimento. El retorno parcial a la litosfera, particularmente al suelo, se hace gracias a actividades como la pesca y, a las aves marinas que se alimentan de peces y depositan sus excrementos en las áreas continentales.

Una buena parte del fósforo es arrastrado desde la parte continental por los ríos hacia el mar, donde se deposita en los sedimentos del fondo del océano. El levantamiento geológico de los depósitos minerales marinos como rocas fosfóricas, lleva este fósforo nuevamente a tierras emergidas, a través de un proceso de millones de años. Una vez que estas rocas están sobre la superficie son meteorizadas y erosionadas liberando los fosfatos.

La actividad humana, particularmente la agricultura, está introduciendo en la actualidad una variable más en el ciclo del fósforo: con el fin de mejorar la producción agrícola, se está adicionando fósforo al suelo que, a su vez, es llevado a los ríos, por donde es transportado a los lagos o al océano. De esta manera se está acelerando el paso de fósforo del continente al mar.

El ciclo del azufre

El azufre es un elemento importante en el sistema global. En primer lugar, es componente de proteínas y algunas vitaminas necesarias para el desarrollo de la vida. En segundo lugar, participa en la formación de fenómenos del sistema, como la nubosidad y la lluvia. Finalmente, como se explicará a continuación, puede ser un regulador del clima planetario.

El azufre se encuentra en las diferentes esferas en forma de compuestos: en la atmósfera se presenta en forma de sulfuros gaseosos, como los dimetilsulfuros (DMS), el sulfuro de carbonilo (OCS), el dióxido de azufre (SO_2) y como aerosoles, como el sulfato (SO_4^{-2}). En los sistemas acuáticos se encuentra como sulfato disuelto y en los sedimentos en forma mineral y como materia orgánica.

Los organismos descomponedores, con ayuda del oxígeno, convierten el azufre orgánico en sulfatos; en esta forma las plantas lo toman a través de la raíz y acumulan una parte en las hojas. El azufre que existe en los suelos proviene inicialmente de la descomposición de la roca madre y luego, de la descomposición de la materia orgánica vegetal.

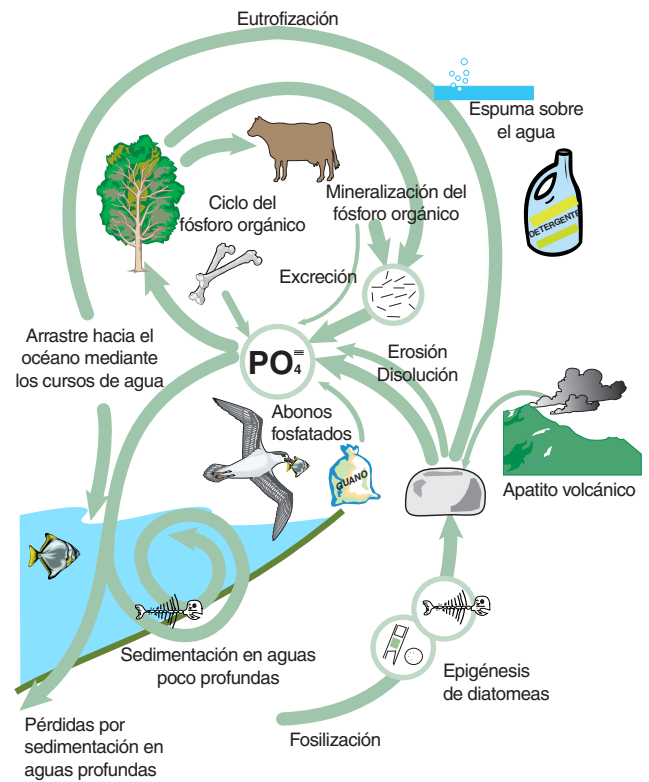


Figura 2.4. Ciclo del fósforo. (Tomado de Duvigneaud, 1978)

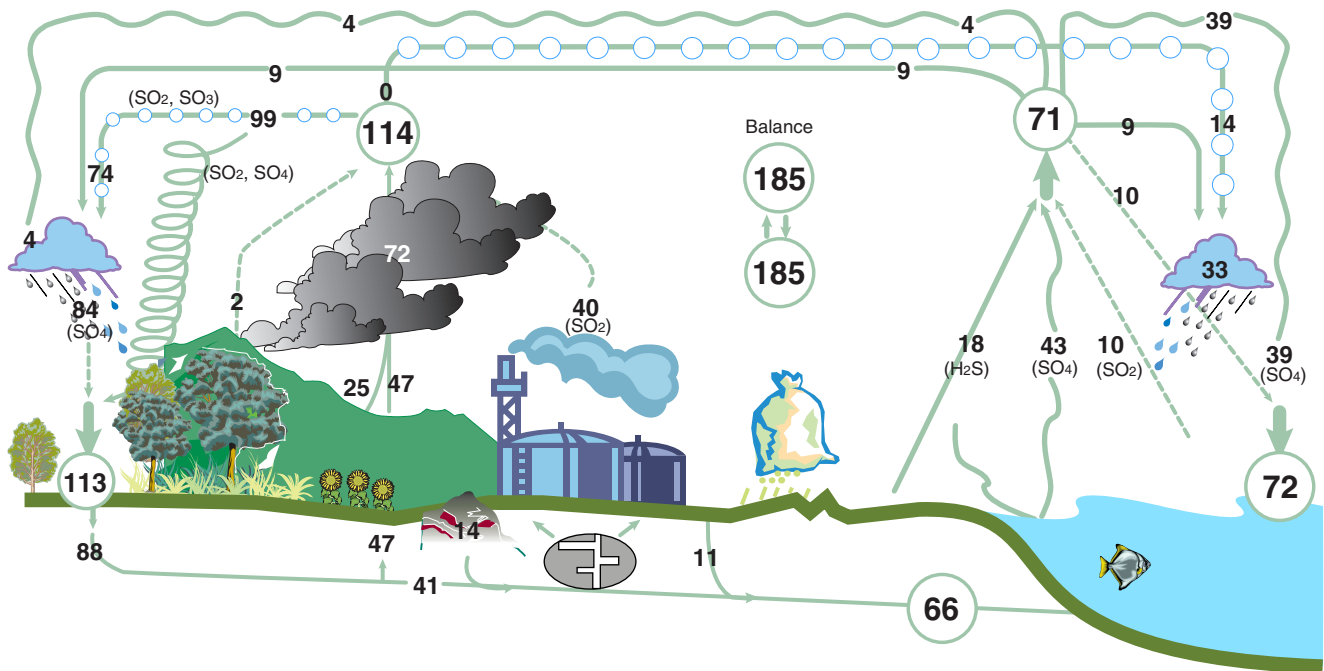


Figura 2.5. El ciclo del azufre. (Tomado de Duvigneaud, 1978)

El DMS es producido por algas en las aguas superficiales del océano, de donde pasa a la atmósfera. Una vez allí, el DMS es oxidado y se convierte en sulfato que, finalmente, conforma pequeñas partículas o aerosoles. Estos últimos actúan como núcleos de condensación en los que se forman las gotitas de agua que constituyen las nubes. De igual manera, las erupciones volcánicas introducen sulfatos en forma de aerosoles a la atmósfera.

El sulfuro de carbonilo es producido en el océano por la disolución de compuestos de azufre, y escapa a la atmósfera. Este gas es inerte en la troposfera, pero en la estratosfera se oxida y convierte en sulfato, formando aerosoles.

Los aerosoles en la atmósfera actúan como una película que refleja la radiación solar. Un incremento de estos aerosoles en la atmósfera genera un enfriamiento. Por esta razón, el ciclo del azufre es importante en la regulación del clima mundial.

El incremento de los procesos en la antroposfera está perturbando dramáticamente el ciclo del azufre. El uso de los combustibles fósiles libera dióxido de azufre, con el que se puede incrementar la cantidad de aerosoles en la atmósfera; de otra parte, al actuar como núcleo de

condensación y reaccionar con el agua, el dióxido de azufre aumenta la acidez de la lluvia. Estas alteraciones en el ciclo del azufre están afectando todas las esferas del ambiente, produciendo cambios en el ambiente mundial.

El ciclo del agua

El agua, importante en el funcionamiento del sistema global, se encuentra en todas sus esferas, constituyéndose así en el compuesto más abundante del sistema. El agua, y su intercambio entre las diferentes esferas, es necesaria para el funcionamiento de cada una de éstas y del sistema global en general.

En la biosfera, el agua compone aproximadamente el 95% de los vegetales y el 60% de animales y de los seres humanos. La mayor parte del agua está en grandes depósitos, como los océanos, que almacenan cerca de 97% del agua total del planeta. Del 3% restante, algo más de 2% está en capas de hielo, glaciares, y en la humedad del suelo y la atmósfera. Un 0,6% del total está disponible como agua fresca en lagos, ríos y fuentes subterráneas, para el sostenimiento de la vida y el desarrollo de los procesos de la antroposfera.

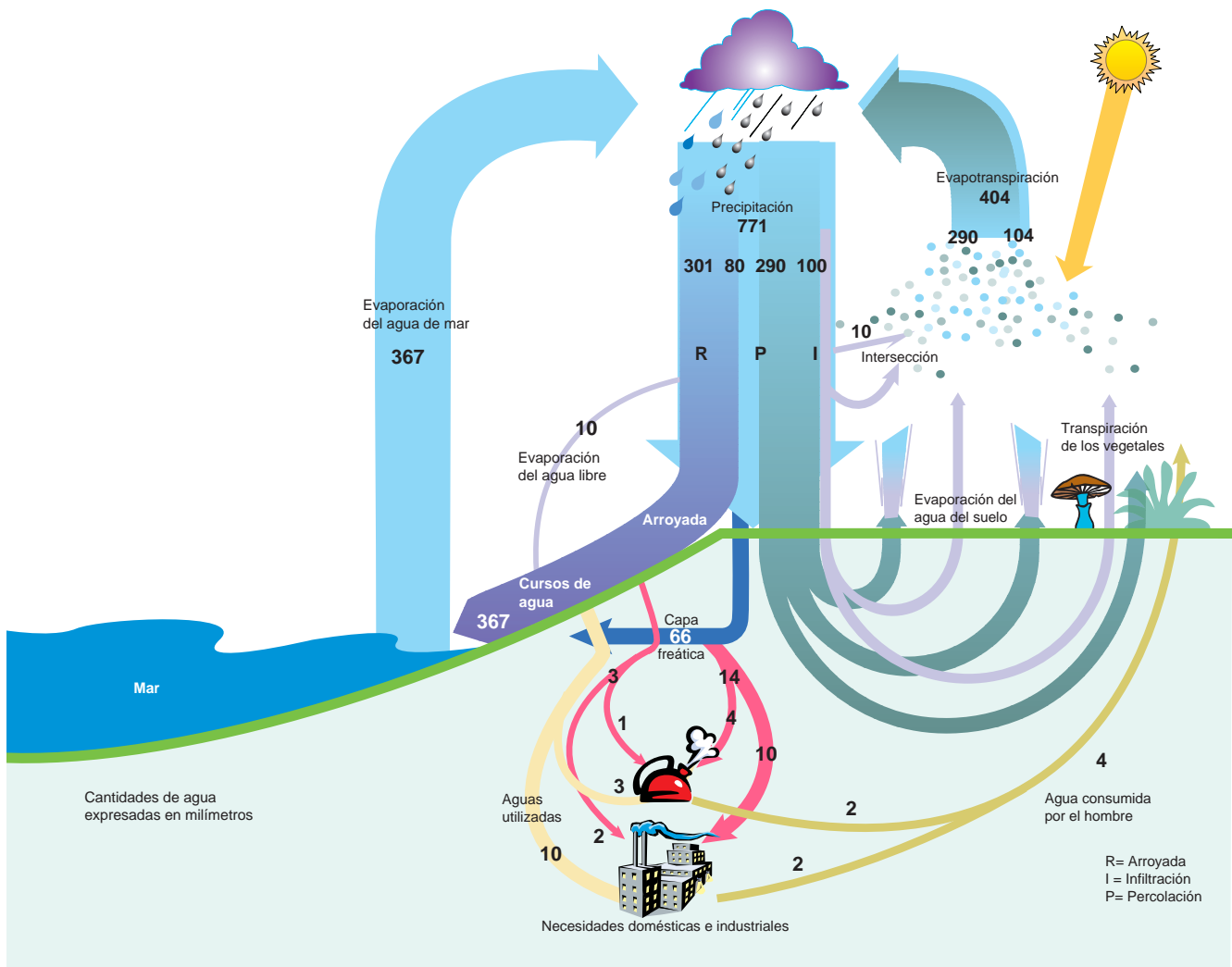


Figura 2.6. El ciclo del agua.

El agua está en constante movimiento; se evapora pasando de la hidrosfera (mares, lagos, ríos, etc.) a la atmósfera. En esta última se condensa, cae a la superficie (continente u océano) de la tierra en forma de lluvia, nieve u otros tipos de precipitación. Una vez en la superficie terrestre, el agua fluye en las corrientes superficiales, se infiltra en el suelo o percola a través del suelo a capas aún más inferiores. Del total que cae como precipitación sobre la superficie terrestre, 20% alcanza el mar a través de corrientes superficiales y un 10% por las corrientes subterráneas.

A través de la evaporación de las aguas superficiales o por la evapotranspiración de las plantas, las moléculas de agua regresan a la atmósfera para completar el ciclo. El 40% del agua que se precipita sobre la superficie terrestre vuelve a la atmósfera por evaporación y el 30%, por evapotranspiración.

En el ciclo del agua no sólo se intercambia masa (agua) entre las esferas, sino que se transporta la energía que se esconde o libera a través de los procesos de transición de fase del agua. Por el transporte de masa y energía a través de las diferentes esferas, el ciclo hidrológico juega un papel importante en el sistema global.

La dinámica de los procesos que se desarrollan en la antroposfera está produciendo cambios importantes en el ciclo hidrológico. Esta alteración, al igual que la de otros ciclos, repercute en otras esferas y en factores del sistema global, como el clima.

El sistema climático y el clima global

El clima es un factor importante del ambiente global, que resulta de la interacción de la energía solar y los procesos que ocurren en y entre las diferentes esferas del ecosistema planetario. El clima juega un papel importante en el desarrollo de las plantas y animales e influye en los procesos de la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera y de la antroposfera. Al mismo tiempo, los procesos que se desarrollan en todas las esferas del ambiente global tienen efecto en el clima.

El clima se puede definir como las condiciones atmosféricas predominantes en un lugar, región o en el planeta durante un periodo dado, las cuales están controladas por los denominados factores forzantes y factores determinantes del clima, y por la interacción entre los diferentes componentes del sistema climático.

Factores forzantes del clima

El clima de la Tierra depende del equilibrio radiativo de la atmósfera, el cual a su vez depende de la cantidad de ra-

diación solar que ingresa al sistema, y de la concentración atmosférica de algunos gases variables que ejercen un efecto invernadero (trazas de gases con actividad radiativa), de las nubes y de los aerosoles. Estos agentes de forzamiento radiativo varían tanto de forma natural como por la actividad humana, produciendo alteraciones en el clima del planeta. Dentro de los factores de forzamiento radiativo se destacan la radiación solar y el efecto invernadero.

El clima de la Tierra sufre cambios que dependen, tanto de los cambios en la forma que se dispersa y se absorbe la radiación de onda corta, como de la absorción y emisión de la radiación infrarroja térmica por parte del sistema Tierra-atmósfera.

La radiación solar y el clima

El motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima es la energía solar. El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento (por la difusión, reflexión en las nubes) y de absorción (por las moléculas de gases y por partículas en suspensión), la radiación solar alcanza la superficie terrestre (océano o continente) que la refleja o la absorbe. La cantidad de radiación absorbida por la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

El efecto invernadero

Algunos de los gases variables, como el vapor de agua y el CO_2 , son relativamente transparentes a la radiación solar en el rango visible, pero absorben la radiación de onda larga saliente de la superficie de la Tierra.

Estos gases irradian parte de la energía absorbida al espacio y parte la retornan en dirección a la superficie de la Tierra. Este intercambio de energía entre la atmósfera y la superficie de la Tierra es conocido como efecto invernadero natural. La temperatura media global de la atmósfera es aproximadamente de 15°C gracias al efecto invernadero. Si no existiera este efecto, la temperatura sería de cerca de -23°C .

El forzamiento radiativo puede verse alterado por cambios en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, provocados por modificaciones en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos. Esta alteración recibe el nombre de efecto invernadero inducido.

Los gases de efecto invernadero

Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4),

el óxido nitroso (N_2O), el ozono troposférico (O_3) y los clorofluorocarbonos (CFC), estos últimos de origen netamente antropogénico.

El más importante de estos gases por su efecto radiativo es el vapor de agua, el cual está sufriendo cambios significativos en su distribución y concentración como consecuencia de la actividad humana. En orden de importancia le sigue el dióxido de carbono, los CFC, el metano, el ozono troposférico y el óxido nitroso.

El contenido de gases de efecto invernadero está sujeto a variaciones y ha experimentado en el pasado variaciones considerables. Estas fluctuaciones en el factor de forzamiento radiativo han producido cambios climáticos. Las variaciones en el contenido de gases de efecto invernadero son debidas a procesos naturales y antropogénicos.

En la actualidad, los procesos antroposféricos están incrementando el contenido de algunos de estos gases en la atmósfera, con lo cual se está induciendo un reforzamiento del efecto invernadero. Esto a su vez conducirá a un calentamiento global y a un cambio climático.

De los gases de efecto invernadero emitidos por la actividad humana, el CO_2 tiene particular importancia debido a que su contribución al cambio de forzamiento radiativo ha sido aproximadamente de 55%, comparado con el 17% de los CFC y el 15% del metano. Por esta razón, se presta gran atención a las concentraciones de gases de efecto invernadero pero, principalmente, a las de dióxido de carbono.

El sistema climático global

Las variables climáticas se relacionan básicamente con la atmósfera. Los procesos atmosféricos se encuentran íntimamente relacionados con la superficie terrestre, los océanos y las zonas terrestres cubiertas por hielo (criosfera). Así mismo, existe una fuerte relación de dichos procesos con la biosfera (vegetación y otros sistemas vivos, tanto del continente como del océano). Sobre este medio natural se desarrolla la actividad humana, que se ve influenciada por el clima, al que a su vez afecta. Estos seis componentes (atmósfera, océano, continente, hielo, biosfera y antroposfera) integran el sistema climático.

Dentro del sistema climático se presenta el intercambio de masa y energía a través de los ciclos biogeoquímicos. Uno de estos procesos de interacción es el ciclo de carbono; gracias a él, se producen variaciones en la composición química y en las propiedades físicas de los componentes del sistema. Este ciclo controla particularmente el contenido de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, regulando así el efecto invernadero y el clima. Aunque todos los componentes del sistema climático están

interrelacionados, cada uno de ellos tiene sus características y funciones dentro del mismo.

Factores fisiográficos determinantes del clima

Los factores determinantes se refieren a ciertas condiciones, en general, fisicogeográficas, relativamente constantes, que no sufren cambios horarios, diurnos o anuales y con gran influencia en el clima por el papel que juegan en la transferencia de energía y calor. Entre los factores determinantes se destacan la latitud, la altitud y la distancia al mar.

Debido a las variaciones de latitud y a las diferencias en la absorción de energía por la superficie terrestre, se forman contrastes de temperatura y de presión atmosférica que dan inicio al movimiento que redistribuye la energía (calor) y la masa (vapor de agua) en la atmósfera del planeta. Es así como la radiación solar se constituye en el empuje inicial de la circulación general de la atmósfera y en factor determinante del clima.

Por ello, el clima de la Tierra sufre cambios cuando varía la cantidad de radiación solar que llega al sistema climático o cuando varían las características de reflexión-absorción-emisión de la superficie terrestre.

El cambio global

El cambio global se puede definir como los cambios generados por los procesos naturales y por la actividad humana, que afectan el medio ambiente global en forma directa o a través de la acumulación de alteraciones locales o regionales.

Las escalas espacio-temporales de los procesos que llevan al cambio global son variadas: algunos, como la deforestación son de escala regional y pueden ser medidos en días; otros, como el calentamiento global y el cambio climático, cubren todo el planeta y se manifiestan en periodos que van desde el decenio hasta el milenio.

Muchos son los procesos que actualmente están conduciendo a un cambio global. Dentro de éstos, los que se desarrollan en la antroposfera juegan un papel importante.

La humanidad está modificando la composición atmosférica, la calidad del agua, las características de la superficie terrestre; cultiva intensiva o extensivamente algunas especies, mientras agota otras; transporta especies propias de una región a otra, etc. Debido a estas acciones se están produciendo cambios en la escala mundial (por ejemplo, el reforzamiento del efecto invernadero y el calentamiento global) o regional con alcance glo-

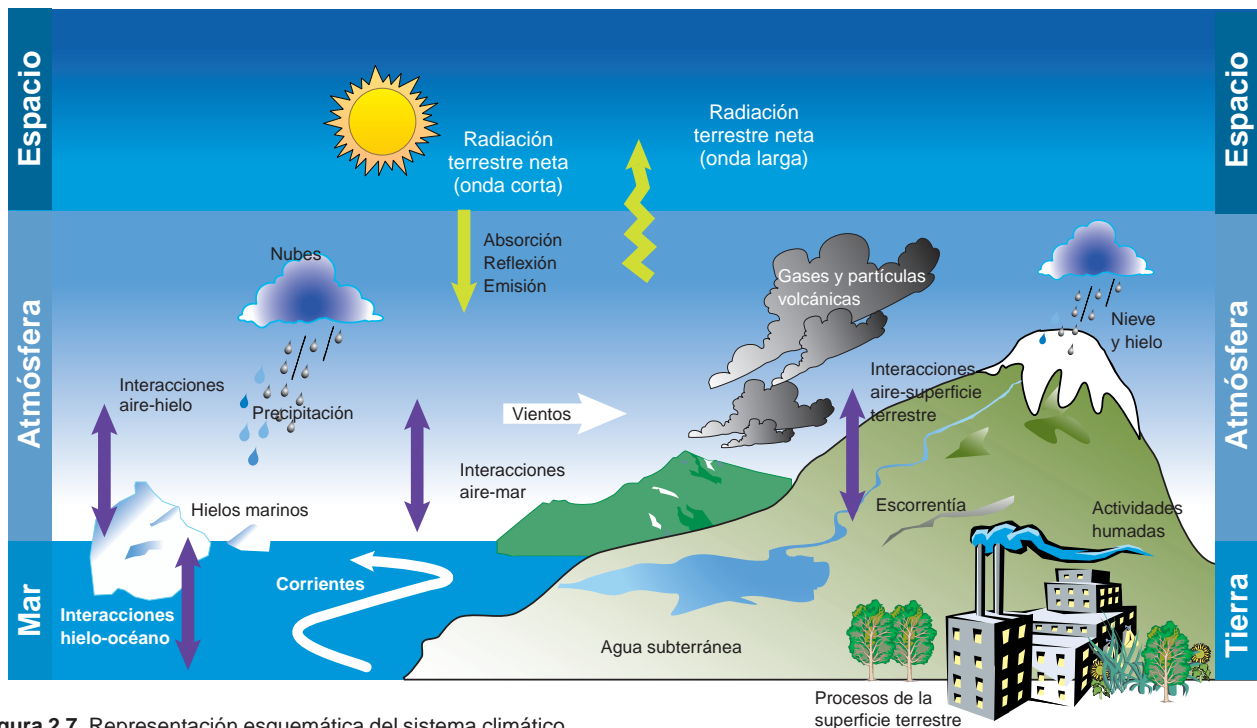


Figura 2.7. Representación esquemática del sistema climático.

bal (el cambio en el uso de la tierra en la Amazonia y el cambio climático).

El cambio global se manifiesta de diferentes maneras. A continuación se presentan los fenómenos que ponen en evidencia a este cambio.

Cambios en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos

Los procesos que se desarrollan en la antroposfera están induciendo una nueva dinámica en los ciclos biogeoquímicos, acelerando algunas fases de los mismos.

Los ciclos del carbono y del nitrógeno, por ejemplo, se han modificado como consecuencia del uso intensivo de combustibles fósiles, la deforestación y algunos procesos agrícolas e industriales. Estos factores han acelerado el flujo del carbono y del nitrógeno de la litosfera y biosfera hacia la atmósfera, intercambio que se desarrollaba hasta ahora en periodos mayores de tiempo (de cientos a millones de años).

El anterior proceso está cambiando la composición química de la atmósfera, lo cual afectará a otras esferas del ambiente global y a factores como el clima del planeta. Un ejemplo de estas modificaciones es el siguiente: el incremento del CO atmosférico aumentaría el flujo de este gas hacia el océano, lo que estimula la producción de algas, y éstas a su vez incrementarían el flujo de DMS hacia la atmósfera. Los sulfatos producidos por la oxidación de DMS en la atmósfera reflejan la radiación solar

hacia el espacio, reduciendo la temperatura y atenuando de esta manera el calentamiento global.

Los cambios en la composición química de la atmósfera

La composición química de la atmósfera ha variado durante la historia de la Tierra. Las causas de estas variaciones se han debido a la interacción con otras esferas como la biosfera y la litosfera, principalmente.

A partir de la revolución industrial (segunda mitad del siglo XVIII) se han incrementado las emisiones de gases a la atmósfera, con lo cual se está cambiando su composición. En la actualidad, estas modificaciones están altamente determinadas por los procesos que ocurren en la antroposfera.

Gracias a la actividad industrial, agrícola, el transporte y la generación de energía se emiten a la atmósfera gases como CO₂, CH₄, NO₂, NO, SO₂, SO₄, entre otros, y desde los años cincuenta están ingresando a ella los compuestos clorofluorocarbonados. Todos estos gases, al cambiar la composición de la atmósfera, afectan el sistema global en tres formas: algunos actúan como contaminantes, alterando la calidad del aire y afectando los procesos de la biosfera en general (el ozono troposférico y el *smog* fotoquímico); otros, los que tienen propiedades como gases de efecto invernadero, al incrementarse refuerzan este efecto en el planeta (el CO₂ y el CH₄, por ejemplo); una tercera categoría de los gases emitidos re-

acciona con otros componentes de la atmósfera, reduciéndolos y produciendo nuevos compuestos, como ocurre en la destrucción de la capa de ozono o en la formación de la lluvia ácida.

Contaminación atmosférica

Los organismos vivos están adaptados a la composición atmosférica que ha predominado, con algunas variaciones, durante, por lo menos, los últimos tres millones de años. Algunos de los gases atmosféricos son tóxicos, pero en las concentraciones que se presentan resultan ser inocuos.

Los organismos vivos se desarrollan dentro de ciertos umbrales de concentración de estos gases en la atmósfera. Cuando la concentración de gases está dentro del umbral óptimo para el desarrollo de los seres vivos, se puede decir que el aire es de buena calidad. Cuando la concentración de alguno o varios gases sobrepasa el umbral o ingresan a él nuevos componentes orgánicos o inorgánicos, se dice que el aire está contaminado. Aunque los conceptos de calidad del aire y de contaminación atmosférica son aplicables a todos los organismos vivos y a objetos materiales, generalmente se utilizan en relación con los seres humanos.

Los contaminantes se pueden definir como aquellos elementos, compuestos o sustancias sólidas, líquidas o gaseosas que, presentes en la atmósfera en determinadas concentraciones, pueden resultar nocivos para los seres vivos o dañinos para los objetos materiales.

La composición del aire puede ser modificada por alteraciones en el intercambio de masa y energía entre las diferentes esferas. Las erupciones volcánicas, por ejemplo, inyectan gases y aerosoles a la atmósfera contaminándola temporal y localmente. En la actualidad, los procesos que se desarrollan en la antroposfera están acelerando el flujo de algunos elementos hacia la atmósfera, incrementando su concentración y contaminando así al aire.

La mayor parte de los contaminantes antropogénicos provienen del uso de los combustibles fósiles para producir la energía necesaria en los procesos de la antroposfera. En general, estos contaminantes provienen de la industria, del transporte, de la producción de energía y de las actividades domésticas.

Los procesos industriales emiten a la atmósfera principalmente óxidos de azufre y de nitrógeno; en cantidades menores se emite plomo metálico. El transporte desecha óxidos de nitrógeno, de plomo y, en menor proporción, óxidos de azufre. Las actividades domésticas producen esencialmente óxidos de azufre y algunas cantidades de óxidos de nitrógeno. El uso de los com-

bustibles fósiles para la generación de energía produce dióxido y monóxido de carbono

Generalmente, la actividad humana se localiza en las ciudades o en sus alrededores, por lo que los contaminantes se emiten en sus cercanías. La circulación atmosférica generalmente los transporta a otras regiones o los difunde de tal manera que no se concentren en el aire sobre el mismo sitio. Sin embargo, bajo ciertas condiciones denominadas de estabilidad atmosférica, el proceso de difusión se inhibe y los contaminantes pueden concentrarse sobre un área determinada y producir problemas en los seres vivos.

La combinación de contaminantes como el óxido de nitrógeno y los hidrocarburos bajo el efecto de la energía solar producen el denominado *smog* fotoquímico, que es una niebla que se posa sobre las ciudades y puede causar problemas respiratorios a la población. Otro de los problemas que generan los contaminantes al reaccionar con otros componentes de la atmósfera es la acidificación de la precipitación, más conocida como lluvia ácida.

La circulación atmosférica puede transportar los contaminantes a grandes distancias; en algunos casos, más allá de las fronteras de un país. Esto último es lo que se conoce como contaminación transfronteriza.

Contaminación de la hidrosfera

Los organismos vivos que habitan en el agua o la necesitan para su normal desarrollo, se han adaptado a las condiciones físicas y químicas de ese medio, ya sea de agua dulce o de agua salada. En ocasiones, por procesos que se desarrollan en otras esferas, cambian las características normales del agua y se sobrepasa el umbral tolerable por los organismos vivos, produciéndose así la contaminación de la hidrosfera.

Un factor importante de cambio de las características de la hidrosfera es la actividad humana. En su mayor parte, la población se ha localizado a la orilla de los ríos, lagos o sobre las costas, y en el desarrollo de sus actividades produce residuos sólidos, líquidos y gaseosos que se vierten a las aguas circundantes.

La mayor parte de los contaminantes del agua provienen de la actividad industrial, minera, agrícola y doméstica. Los sectores mineros e industriales vierten al agua residuos como químicos orgánicos sintéticos, pesticidas y componentes inorgánicos.

El uso de fertilizantes y pesticidas en la agricultura también contribuye a la contaminación de las aguas, lo mismo que la reducción de cobertura vegetal en las diferentes cuencas, que lleva al incremento de sedimentos en las corrientes de agua, lo que implica un cambio en sus características físicas y el deterioro de su calidad.

En las zonas industriales, el agua depositada en la atmósfera reacciona con los contaminantes del aire e incrementa su acidez; las gotitas ácidas, al precipitarse, pueden llegar a los lagos y cambiar las características físicas de estos cuerpos de agua, con las correspondientes consecuencias para quienes dependen de ellos.

La lluvia ácida

La lluvia ácida es una precipitación acuosa que contiene en disolución ácidos sulfúrico y nítrico, producidos por la combinación de los contaminantes óxido de azufre y de nitrógeno con el vapor de agua atmosférico. Una lluvia se considera ácida si su pH es inferior a 5.6.

El óxido de azufre se origina en la combustión de ciertos tipos de carbón mineral, del petróleo y sus derivados y por la actividad volcánica. En cuanto al dióxido de nitrógeno, se genera en los procesos de combustión a elevadas temperaturas y en los motores de combustión.

Las lluvias ácidas, empujadas por la circulación atmosférica, pueden precipitarse lejos de los focos contaminantes e incluso ir más allá de los límites del país donde se origina, relacionándose también con la contaminación transfronteriza.

Existen evidencias de que grandes extensiones boscosas han sufrido las consecuencias de este problema, a menudo originado a grandes distancias. Al igual que los bosques, los lagos de montaña quedan afectados, de modo que la acidificación de sus aguas acarrea el empobrecimiento de sus comunidades biológicas y puede ocasionar la desaparición de comunidades piscícolas.

El deterioro de la capa de ozono

Como se verá en el capítulo del clima, en la atmósfera se presenta el ozono, con mayor concentración en la estratosfera inferior, entre los 22 y los 25 kilómetros de altura, capa que se denomina la capa de ozono. Esta es la cubierta que protege la superficie terrestre de la acción letal de los rayos ultravioleta.

El ozono se produce en la atmósfera a esta altura por el siguiente proceso: la acción de la radiación solar sobre las moléculas diatómicas de oxígeno (O_2) produce dos átomos de oxígeno (O); éstos, a su vez, se combinan con moléculas de oxígeno para formar el ozono (O_3). Estas moléculas también son descompuestas por la radiación ultravioleta proveniente del Sol, con lo cual se mantiene un balance de átomos de oxígeno, moléculas de oxígeno y de ozono. Este balance puede alterarse si se presentan reacciones de O, O_2 y O_3 con cloro, nitrógeno o bromo.

Las actividades humanas inyectan a la atmósfera compuestos de estos elementos. En los últimos decenios se están emitiendo clorofluorocarbonos (CFC) a la atmósfera, propiciando con ello la destrucción de la capa de ozono que protege al planeta de la radiación ultravioleta.

Los CFC ingresan a la atmósfera y después de un tiempo logran llegar a la estratosfera, donde la radiación ultravioleta los descompone dejando átomos de cloro que se unen a los átomos de oxígeno y producen el óxido de cloro (ClO). La formación del ClO limita la formación de O_3 en la estratosfera, disminuyéndose así la cantidad de ozono en esa capa.

Según las observaciones que se realizan en el nivel mundial, la disminución del ozono estratosférico es más marcado en la Antártida. Los niveles de reducción de esta región son los más grandes del planeta: allí, los valores muy bajos de contenido de ozono se observan en octubre (primavera del hemisferio Sur) y cubren una gran área. Esta zona con valores bajos de concentración de ozono estratosférico sobre la Antártida se conoce como el agujero de ozono, que se ha venido aumentando durante los dos últimos decenios. En la zona tropical, el ozono, aunque presenta variaciones, tiende a mantenerse en concentraciones relativamente constantes.

La disminución de la capa de ozono traerá problemas a los organismos vivos, ya que se aumenta la cantidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie. Entre los problemas que podrían producirse figuran el incremento de los casos de cáncer de piel y de enfermedades como cataratas en los ojos.

Se estima que una reducción de 1% del ozono estratosférico incrementa la radiación ultravioleta que llega a la superficie entre 1% y 3%, lo que conduciría a incrementos de 2% a 5% de casos de cáncer de piel. Se considera que el aumento de la radiación ultravioleta por la reducción de la capa de ozono podría producir daños en el sistema inmunológico, además de los efectos imprevisibles en la vegetación terrestre y en el fitoplancton marino.

El calentamiento global y el cambio climático

De otra parte, el incremento de gases a causa de la actividad humana, como el CO_2 y el CH_4 , entre otros, que actúan como gases de efecto invernadero, está reforzando esta característica propia de la atmósfera.

El incremento de los gases de efecto invernadero está produciendo la elevación de la temperatura media global del aire, fenómeno conocido como el calentamiento global. Se estima que durante los últimos 100 años, la

temperatura media global se ha incrementado entre 0,3 °C y 0,5 °C. De la misma manera, se ha establecido que este calentamiento será diferenciado sobre el planeta: algunas regiones tendrán mayor incremento de la temperatura que otras.

El carácter diferenciado del calentamiento producirá cambios en la distribución de la presión atmosférica, en los sistemas de circulación, en la distribución y frecuencias de las lluvias y de los fenómenos atmosféricos y climáticos. Todos estos cambios en los elementos climatológicos se conocen como cambio climático.

Este calentamiento global conducirá a la desaparición de los glaciares de montaña y al incremento del nivel medio del mar, entre otros efectos.

El incremento del nivel del mar

Bajo las condiciones de una atmósfera más cálida, se produciría el derretimiento de los glaciares de montaña y de los casquetes polares. El calentamiento produciría una expansión térmica del agua, y a causa del derretimiento de la criosfera y de la expansión térmica, se produciría el incremento del nivel del mar en la escala mundial.

Este incremento traería problemas a las zonas costeras y a los territorios insulares del planeta, pues el agua de mar podría inundar parte del área actual de las ciudades costeras. Fenómenos como el alto oleaje y las mareas altas llegarían a niveles más altos que los actuales. Adicionalmente, con el aumento del nivel del mar, los territorios localizados en los deltas de los grandes ríos podrían inundarse permanentemente por el represamiento de las aguas.

Igualmente, con la elevación del nivel del mar se podría presentar intrusión de aguas saladas en los sistemas de agua dulce de zonas costeras, con las consiguientes consecuencias sobre la vida animal y vegetal en esos cuerpos de agua.

Se estima que durante los últimos 100 años se ha presentado un incremento en el promedio mundial del nivel del mar del orden de los 12 ± 5 cm. De continuar con el ritmo del calentamiento actual, el incremento en los próximos 100 años estaría en el umbral de los 30-80 cm.

Cambios en la cobertura de la superficie terrestre

La actividad humana está alterando la cobertura vegetal, modificando con ello el ciclo hidrológico y del carbono, entre otros. De igual manera, las alteraciones de cobertura vegetal están causando cambios en el balance de radiación del sistema planetario, afectándose así factores importantes, como el clima.

La intensificación de los procesos en la antroposfera está provocando una reducción de la cobertura vegetal de la superficie terrestre, ocupada para otros usos. La destrucción de la masa forestal en todo el planeta constituye en la actualidad, una de las principales amenazas para el equilibrio del ecosistema terrestre, alterando el régimen de lluvias, facilitando el calentamiento de la superficie y el proceso de desertización, a causa de los efectos erosivos de la lluvia.

El cambio en la cobertura vegetal puede repercutir de diversas maneras sobre el clima: por medio de los ciclos del carbono y del nitrógeno, de la variación de la reflectividad del terreno cuando se talan los bosques y por medio de sus efectos sobre el ciclo hidrológico, la rugosidad de la superficie y, en consecuencia, sobre la circulación atmosférica, que puede producir efectos no inmediatos sobre el clima.

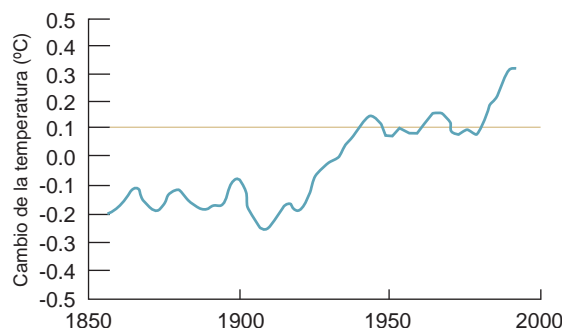
El problema alcanza grandes dimensiones en las regiones tropicales y subtropicales, ya que justamente es allí, en un área inferior a 10% del total del planeta en la que se encuentra más de 50% de la biomasa, donde los procesos de deforestación son más intensos en la actualidad.

Los factores que determinan la deforestación de esta área son: el uso de madera como combustible, la necesidad de obtener tierras de cultivo para alimentar la población en rápido crecimiento, el aumento de la actividad ganadera, la exportación de maderas preciosas y la construcción de vías de infraestructura y grandes represas. Se calcula que cada año se destruyen 20 millones de hectáreas de selvas tropicales.

Implicaciones del cambio global para Colombia

Colombia está involucrada en el problema del cambio global en dos sentidos: de una parte, se verá afectada por sus diferentes manifestaciones y, de otra, está participando regionalmente con las causas de este fenómeno.

Como en todos los países desarrollados o en vías de desarrollo, los diferentes sectores productivos colombianos emiten a la atmósfera gases de efecto invernadero. Aunque el volumen de estas emisiones, comparado con el de otros países (capítulo 7 de este libro) es menor, Colombia participa de alguna manera en las causas del problema del incremento del efecto invernadero, del calentamiento global y del cambio climático. De igual manera, en Colombia se han emitido sustancias que deterioran la capa de ozono, las mismas que actualmente se están controlando en cumplimiento de compromisos internacionales.



Valor mundial de las temperaturas combinadas tierra-aire y superficie del mar. 1861-1993 en relación con el promedio correspondiente 1951-1980.

Figura 2.8. Comportamiento de la temperatura media global desde 1850. (Tomado de la OMM, 1990)

Además, con el avance de la frontera agrícola en el territorio nacional se está dando un proceso de disminución de la cobertura vegetal: se estima que en Colombia la pérdida de cobertura boscosa durante el periodo 1983-1996 fue del orden de las 250.000 hectáreas anuales.

La contaminación del aire y del agua en el territorio colombiano se presenta en escalas menores o sólo localmente, en comparación con los países industrializados; sin embargo, es conveniente reconocer que en los casos de las grandes ciudades este problema se está acentuando.

La lluvia ácida en Colombia aún no se manifiesta como problema agudo, aunque en algunos lugares, el Ideam ha medido pH de lluvia menores de 5.6.

El territorio colombiano podría verse afectado por el calentamiento global, que para la zona tropical, según lo estiman los modelos climáticos, sería del orden de los 2 °C en los próximos 100 años. De la misma manera se presentarán cambios en la distribución de la precipitación en el territorio nacional, aunque las alteraciones serían diferentes en las regiones del país: en algunas podría presentarse mayor precipitación que en la época actual, mientras que en otras podría ser menor.

En cuanto al efecto de la reducción de la capa de ozono en el territorio colombiano, es conveniente anotar que en la zona tropical tiene un ritmo muy bajo en comparación con el que se presenta en las latitudes medias y altas. No obstante, se debe tener en cuenta que, en cuanto a la distribución global del ozono, en el norte de Suramérica se presenta un área con menor cantidad de este gas, lo que no quiere decir que el ozono estratosférico se esté destruyendo más en esta región.

En Colombia un efecto del cambio global es el retroceso de los glaciares localizados en las montañas. Este proceso es la evidencia más clara en el territorio colom-

biano del calentamiento que se está registrando en la escala global. Según algunos estudios, durante los últimos veinte años el ritmo de este retroceso ha aumentado.

Otra manifestación del cambio global que podría afectar a Colombia es el incremento del nivel del mar, que podría traer consecuencias de gran magnitud en las zonas costeras e insulares, como también en las zonas de los deltas de los grandes ríos del país.

Acciones internacionales para afrontar los efectos e impactos del cambio global

Para garantizar la sostenibilidad de la vida, y ante el riesgo que suponen los cambios globales inducidos por el hombre, en el nivel mundial se adelantan acciones orientadas a minimizar las alteraciones que la actividad socioeconómica global produce en el ecosistema planetario. Los sectores académicos, científicos, económicos, políticos han tomado conciencia de la magnitud de los problemas; gracias a ello, se han logrado acuerdos concretos para limitar las emisiones de los gases de efecto invernadero, de los gases que destruyen la capa de ozono, así como de otros convenios que buscan evitar la contaminación de la hidrosfera. Acuerdos como el Convenio de Viena, con las obligaciones del Protocolo de Montreal, y la Convención Marco sobre Cambio Climático, con los compromisos de Protocolo de Kioto, conllevan a soluciones graduales para reducir la magnitud del cambio global y sus consecuencias.

De la misma manera, para reducir las incertidumbres en la toma de decisiones para un ambiente cambiado en el mañana, se están desarrollando programas científicos internacionales cuyo objetivo es conocer cada vez mejor el funcionamiento del ecosistema global. En el marco de esta acción se han conformado redes de investigadores y de instituciones científicas para mejorar el conocimiento de las causas del cambio, que permitan desarrollar modelos interpretativos y evaluar la respuesta del medio a las influencias de origen antropogénico. La comunidad académica internacional se ha organizado en el *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP), para tratar los temas relacionados con el cambio global; también existen redes regionales, como la ENRICH (*European Network for Research in Global Change*), el IAI (Instituto Interamericano para el estudio del Cambio Global) y la APN (*Asia Pacific Network*).

Organismos intergubernamentales, como la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA),

han estructurado el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC): este organismo reúne a la comunidad académica mundial para realizar evaluaciones científicas sobre el cambio climático y sus impactos, con el fin de orientar las estrategias de respuesta que debe tomar la comunidad mundial ante este problema.

A comienzos del decenio de los noventa, el IPCC, fundamentado en el análisis de la evolución del contenido de gases de efecto invernadero en la atmósfera y considerando la dinámica actual de los procesos en la antroposfera, desarrolló una serie de escenarios predictivos de lo que ocurriría en un futuro con las concentraciones de estos gases bajo diferentes condiciones, llegando a cuatro de los escenarios siguientes:

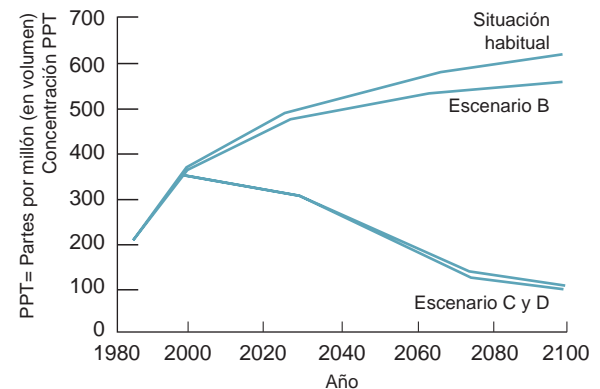
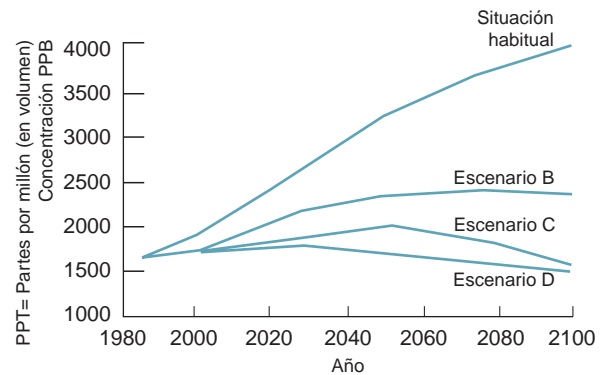
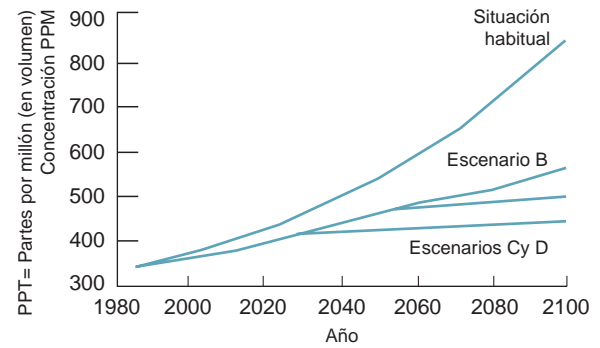
- El primero, designado como escenario a, con el mismo nivel de emisiones que en 1990;
- El segundo, el escenario b, con una reducción de 50% respecto a 1990;
- El tercero, el escenario c, con una reducción de 2% anual desde 1990;
- El cuarto, el escenario d, con un aumento de 2% anual de las emisiones desde 1990 hasta 2010 y con una reducción anual de 2% de ahí en adelante.

Los resultados de estos modelos han permitido inferir que, con estos escenarios, para 2100 se habría dado un incremento de la temperatura media mundial entre 1 °C y 3 °C, respecto de la de 1990, y un aumento del nivel del mar de 30 a 60 cm (figura 2.11).

Esta situación llevó a la firma del Protocolo de Kioto en diciembre de 1997, en el cual las naciones de los países desarrollados, principales emisores de estos gases, se han visto comprometidas a emprender acciones para reducir su nivel de emisiones, bien sea mediante mejoras tecnológicas o por la adopción de programas para crear sumideros de gases de efecto invernadero.

La Convención de Viena y el Protocolo de Montreal

Después de ser publicada en 1975 la primera declaración de la comunidad científica mundial alertando sobre el peligro de la reducción de la capa de ozono, se iniciaron diferentes acciones con el fin de solucionar el problema. Con los años, se logró un mayor conocimiento del fenómeno y se llamó la atención de los niveles políticos en diferentes partes del mundo sobre este problema global. Gracias a esto y a muchas otras acciones, en marzo de 1985 se firmó la Convención de Viena, que en 21 artículos expresa el interés de los diferentes go-



Concentraciones atmosféricas de anhídrido carbónico y CFC-11 que resultan de los cuatro escenarios IPCC de emisión.

Figura 2.9. Escenarios de emisiones de CO₂, según IPCC, 1990.

biernos de proteger la salud humana y el ambiente de los efectos de la destrucción de la capa de ozono. Allí se convino además la preparación de medidas concretas para controlar este problema.

En septiembre de 1987, las naciones del mundo entero, en el marco de la Convención de Viena, firmaron en Montreal (Canadá) un protocolo en el que se comprometieron a tomar medidas, a partir de enero de 1989, para reducir las emisiones a la atmósfera de productos susceptibles de dañar la capa de ozono. La meta inicial

en este compromiso era lograr una reducción de 50% de las emisiones de CFC a la atmósfera hacia el 2000.

Años después, ante la evidencia de que otras sustancias compuestas de cloro y bromo participan en la destrucción del ozono, se hicieron modificaciones y ajustes al Protocolo de Montreal (Londres, 1990; Copenhague, 1992).

Esta actividad mundial está dando resultados en la actualidad, a dos años del 2000. El Sistema de Vigilancia de la Atmósfera Global revela que el contenido de sustancias que deterioran la capa de ozono ha comenzado a declinar.

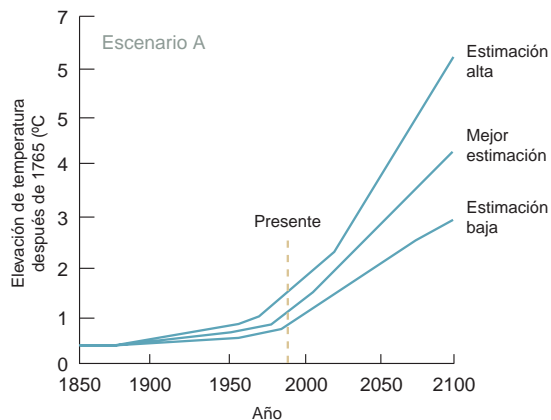
La Convención Marco de Cambio Climático y el Protocolo de Kioto

De otro lado, el convencimiento de que las emisiones antropogénicas de algunos gases podrían reforzar el efecto invernadero de la atmósfera del planeta, llegó hasta los niveles políticos. Justamente, en la Cumbre de Río de Janeiro, realizada en 1992 con la participación de los altos niveles políticos de la mayoría de países del mundo, uno de los principales temas ambientales a los que se les dio relevancia fue el del cambio climático. En Río de Janeiro, varios países firmaron la Convención Marco de Cambio Climático, en la que se exponía el compromiso de los firmantes de controlar las emisiones de gases de efecto invernadero y estabilizarlas en 2000. Aunque en esa ocasión no firmaron todos los países participantes, a lo largo de los años se está dando un proceso de adhesiones y ratificaciones a la Convención.

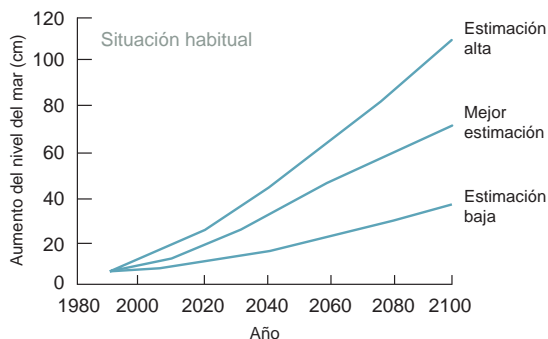
Este compromiso se fortaleció a través de las acciones concretas que acordaron los países en Kioto (Japón) en diciembre de 1997, a las cuales se llegó después de un largo proceso de negociaciones iniciado al firmar la Convención. En la Tercera sesión de la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Cambio Climático, se adoptó formalmente el Protocolo de Kioto, que establece legalmente obligaciones a los países desarrollados (llamados 'países del Anexo I', en la terminología de la Convención) para que hacia el periodo 2008-2012 se logre reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un promedio mundial de 5.2%, respecto a las emisiones de 1990. Este protocolo no impone obligaciones a los países en desarrollo.

Los elementos más importantes del Protocolo de Kioto son:

- Una meta global para los países desarrollados de reducción de las emisiones de seis gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆) a niveles 5.2% por debajo de los de 1990.
- Metas diferenciadas para el Anexo I.



Incremento de la temperatura media mundial en el período 1850-1990, por incrementos observados de gases de efecto invernadero, y predicciones sobre el incremento entre 1990 y 2100 como consecuencia de las emisiones en la situación habitual.



Aumento del nivel del mar previsto como resultado de las emisiones en la situación habitual.

Figura 2.10. Proyecciones sobre el incremento de la temperatura y elevación del nivel del mar considerando el escenario habitual.

- Variedad de alternativas que pueden ser adoptadas por un país individual, para alcanzar las metas que se ha propuesto en cuanto a reducción de emisiones.
- No hay compromiso de los países en desarrollo.

Colombia y las acciones internacionales

Colombia participa plenamente de la actividad internacional orientada a prevenir, conocer y mitigar las consecuencias del cambio global.

El país forma parte de los organismos regionales y mundiales que se ocupan de diferentes aspectos de este problema; así, Colombia es miembro de la Organización Meteorológica Mundial y hace seguimiento a al clima mundial con la red de estaciones meteorológicas operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y

Estudios Ambientales, Ideam. De igual manera, participa en el Programa Mundial del Clima liderado por la OMM, así como en diferentes grupos del IPCC.

En el marco regional, Colombia participa en los programas del Instituto Interamericano para el Estudio del Cambio Global.

Diferentes universidades, institutos y entidades colombianas están desarrollando investigación sobre temas relacionados con los procesos del ecosistema global, tanto en el nivel local como en la escala mundial.

Es de destacar que Colombia es uno de los países signatarios del Protocolo de Montreal y de la Convención Marco sobre el Cambio Climático. En el nivel nacional se han tomado medidas para limitar las emisiones de gases que destruyen la capa de ozono y de gases de efecto invernadero.

En cumplimiento de los compromisos que impone el Protocolo de Montreal, Colombia ha impulsado durante los últimos años, a través de los esfuerzos del sector estatal y privado, una renovación tecnológica orientada a reducir las emisiones nacionales de los gases que destruyen la capa de ozono.

Referencias bibliográficas



- Christopherson, RW, 1992. *Geosystems: An introduction to physical geography*, McMillan Publishing Company, New York
- Duvigneaud, P, 1978. *La síntesis ecológica*, Alhambra S.A., Madrid
- Hidore, JJ y Oliver, JE, 1993. *Climatology: An atmospheric science*, McMillan Publishing Company, New York
- Mackenzie, FT y Mackenzie, JA, 1995. *Our changing planet: An Introduction to earth system science and global environmental change*, Prentice Hall, Upper Saddle River
- OMM, 1990. *La OMM y el calentamiento global*, Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, N° 741
- Ramade, F, 1981. *Éléments d'écologie appliquée. Action de l'homme sur la biosphere*. (Versión en ruso traducida de la segunda edición original de McGraw Hill, 1978). Gidrometeoizdat, Leningrado
- WMO-UNEP, 1995. *The changing ozone layer*, (por Rumen D. Bojkov), World Meteorological Organization-United Nations Environment Programm, Geneve