

# **TEMA 1. INTRODUCCIÓN A LAS CIENCIAS AMBIENTALES**

## 1. EL CONCEPTO DE MEDIO AMBIENTE

## 2. LOS MÉTODOS DE ESTUDIO EN LAS CIENCIAS AMBIENTALES

- La utilización de modelos

## 3. TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS

- Concepto de sistema
- Componentes de un sistema
- Sistemas y termodinámica
- Tipos de sistemas
- Enfoques reduccionista y holista
- Modelado de sistemas abiertos
- Relaciones causales

## 4. EL SISTEMA PLANETA TIERRA

- Los subsistemas terrestres: atmósfera, hidrosfera, geosfera y biosfera
- Las relaciones entre los subsistemas terrestres:
  - La atmósfera en el sistema Tierra
  - La hidrosfera en el sistema Tierra
  - La geosfera en el sistema Tierra
  - La biosfera en el sistema Tierra. La hipótesis Gaia.
- Evolución histórica del sistema Tierra

## **1. EL CONCEPTO DE MEDIO AMBIENTE**

El concepto de medio ambiente es algo intuitivo. Comúnmente se ha definido como el entorno natural en el que habita cualquier organismo, pero desde el punto de vista antropocéntrico el medio ambiente se ha considerado ligado a los problemas ambientales que ha causado la humanidad, y que cada día influyen más en la sociedad.

El interés por el medio ambiente surge a principios del siglo XX a resultas de los daños que ocasionaba la actividad humana. Esta toma de conciencia llevó, en la década de los 70, a la creación de organismos mundiales encargados de velar por los ecosistemas y por la adecuada explotación de los recursos y así en 1972, se organizó en Estocolmo la **1ª Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente**. En ella se reconoció el daño causado en el medio ambiente como resultado de las actividades humanas, lo que conlleva la pérdida de calidad de vida, y como los problemas ambientales de los países industrializados están ligados a su desarrollo tecnológico incontrolado y en los países pobres los principales problemas son debido a su bajo desarrollo económico.

### **Definición de medio ambiente**

Una de las definiciones más aceptadas actualmente fue la establecida en la **Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente** de Estocolmo:

**“El medio ambiente es el conjunto de componentes físicos, químicos, biológicos y sociales capaces de causar efectos directos o indirectos, en un plazo corto o largo, sobre los seres vivos y las actividades humanas”.**

Según esta definición el medio ambiente es todo nuestro entorno en un momento determinado, no solamente los elementos naturales, sino los elementos sociales y culturales que se deben a la especie humana. Además, esta definición contempla una dimensión temporal, es decir, que el medio ambiente cambia continuamente ya sea por causas naturales o por la acción del hombre (acción antrópica).

Existen otras muchas formas de definir el medio ambiente, ya que se trata de algo complejo que permite diferentes matices según el punto de vista y del propósito para el que se quiera definir. Algunas definiciones son estas:

- **Enfoque tradicional:** “Espacio en el que se desarrolla nuestra existencia pero del que no formamos parte”, es decir, todo aquello que nos rodea.
- **Enfoque económico,** el medio ambiente se puede definir como “una fuente de recursos naturales, un soporte de actividades productivas y un receptor de desechos y residuos”.
- **Enfoque administrativo-legislativo:** “El medio ambiente es un sistema constituido por el ser humano, la flora y la fauna, el suelo, el aire, el agua, el clima, el paisaje, los bienes materiales, el patrimonio cultural y las interacciones entre todos estos factores”. (Directriz 85/337 de la UE).

Las diferentes acepciones de medio ambiente, presentan dos características comunes:

- a) El ambiente siempre se refiere a una entidad, es decir, se trata del entorno de algo o de alguien.
- b) Ni dicha entidad, ni los componentes de su ambiente presentan limitaciones, pudiendo ser ambos de naturaleza química, física o biológica.

## **2. LOS MÉTODOS DE ESTUDIO EN LAS CIENCIAS MEDIOAMBIENTALES**

Las Ciencias Medioambientales constituyen una disciplina de síntesis que integra las aportaciones parciales de diferentes disciplinas, entre las que destacan las Ciencias de la Naturaleza (Biología, Geología, Física y Química), junto con otras pertenecientes al campo de las Ciencias Sociales y Humanidades, como la Geografía, Historia o Derecho.

La comprensión del medio ambiente necesita, por tanto, una metodología interdisciplinar, ya que requiere métodos y enfoques muy diversos y que son difíciles de unir a priori.

El procedimiento básico de estudio del medioambiente es el de las ciencias experimentales, es decir, el **método científico**, que combina la inducción y deducción, y por tanto es un proceso hipotético-deductivo, que requiere la experimentación para verificar las hipótesis.

Pero, el estudio del medio ambiente es difícilmente abordable en la laboratorio, debido a la gran cantidad de elementos, variables y relaciones que se establecen entre ellos, por eso, resultan útiles otras metodologías, como:

- Utilización de modelos
- Teoría de sistemas

**Modelos**

Una manera de abordar un problema ambiental que requiera de muchos factores es la elaboración de modelos, que dan pie a simulaciones en las que se pueden modificar las variables que se desee.

Un **modelo** es una representación simplificada de la realidad, que se elabora para facilitar su comprensión y estudio.

Los modelos resultan muy útiles en investigación y su elaboración implica varios aspectos opuestos:

- Deben presentar la realidad lo más fielmente posible
- Deben ser más sencillos y manejables que las situaciones reales.

Para elaborar un modelo, primero hemos de establecer qué uso vamos a darle y, según ello, que aspectos de la realidad o variables vamos a utilizar y qué relaciones existen entre las mismas.

Los científicos revisan continuamente sus modelos tratando de lograr una mayor aproximación entre la teoría y la realidad, y así aumentar la precisión de las predicciones. Es importante no olvidar que un modelo no es la realidad, sino una representación que nunca coincide exactamente con ella.

Tipos de modelos

- **Modelos mentales:** son las representaciones que hacemos en nuestra mente de la realidad, para simplificarla.
- **Modelos formales:** son representaciones que realizamos utilizando un lenguaje concreto y preciso. Normalmente se emplea el lenguaje matemático, en forma de ecuaciones que relacionen las variables implicadas. Su importancia, además radica en que pueden hacer precisiones con la exactitud necesaria, como controlar la puesta en órbita de un satélite espacial con la precisión adecuada.

Cuando intervienen muchas variables, la elaboración de modelos matemáticos puede resultar muy complicada, por lo que se recurre a **modelos simulados por ordenador**. Se parte de un modelo predictivo y se establecen diferentes hipótesis posibles, acerca de las variables que intervienen en el mismo y su evolución temporal. Cada hipótesis determina unas condiciones iniciales, lo que constituye un escenario concreto. Es necesario simular todos los escenarios planteados y, como las diferentes simulaciones pueden proporcionar distintos resultados.

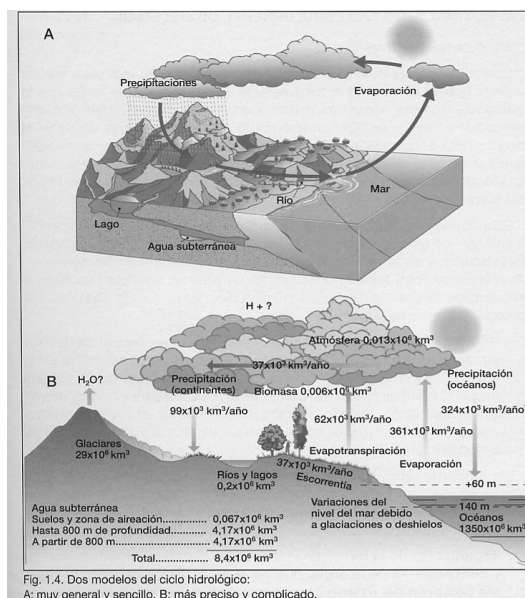
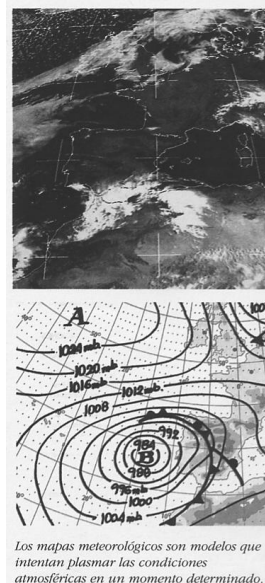


Fig. 1.4. Dos modelos del ciclo hidrológico: A: muy general y sencillo. B: más preciso y complicado.

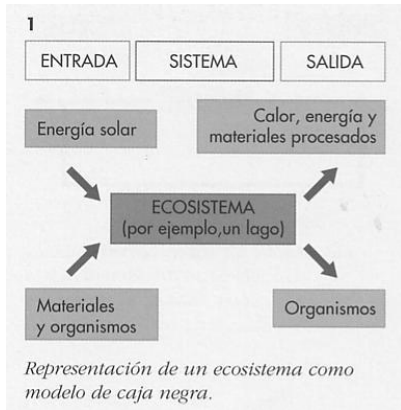


Los mapas meteorológicos son modelos que intentan plasmar las condiciones atmosféricas en un momento determinado.

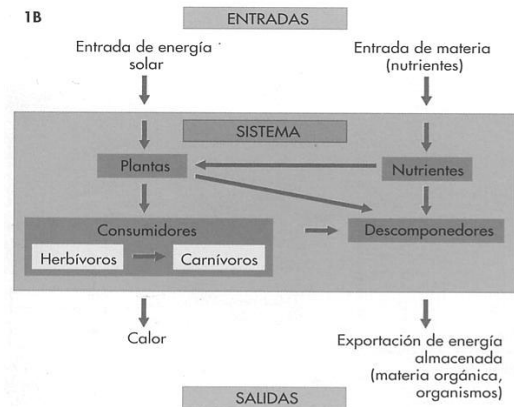
**MODELADO DE ECOSISTEMAS**

**Modelo VERBAL:** “Los ecosistemas se pueden definir como el conjunto de componentes biológicos (seres vivos y sus relaciones) y abióticos (medio físico y sus factores), a través de los cuales fluye la energía y se ciclan los nutrientes”.

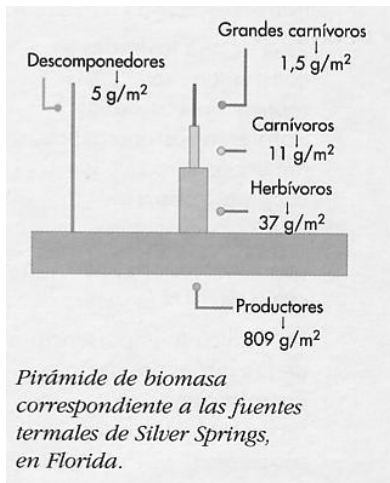
**Modelos GRÁFICOS variados**



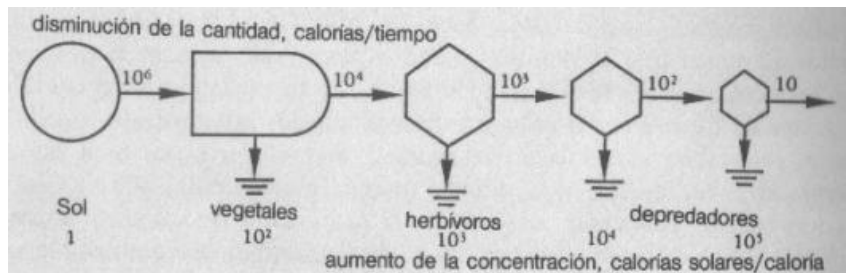
**Modelo de caja negra**



**Modelo de caja blanca**



**Modelo de pirámide**



**Modelo de Odum**

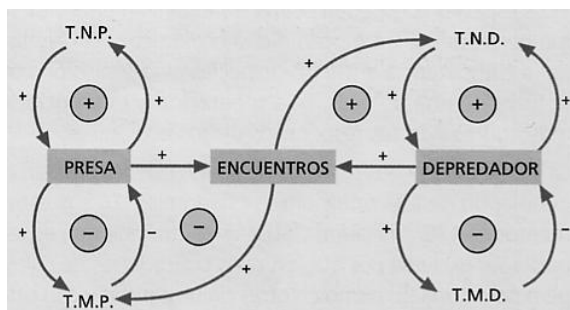
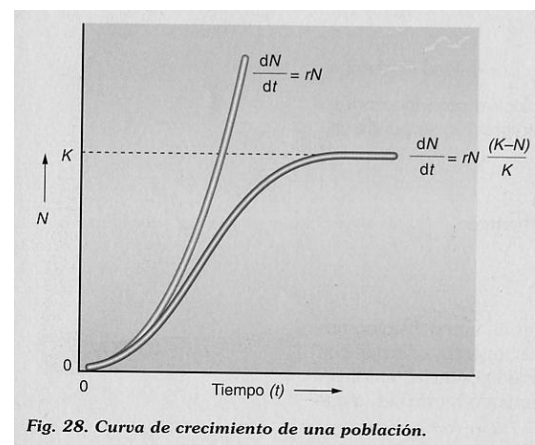


Figura 33. Modelo causal de las relaciones entre las poblaciones del predador y la presa.

**Modelo de relaciones causales**



**Modelo formal de crecimiento de una población**

### **3. TEORÍA DE SISTEMAS**

La Teoría General de Sistemas (TGS) fue propuesta formalmente en 1949 por Ludwig von Bertalanffy, que en 1937 ya había presentado un esbozo de sus ideas.

La teoría general de sistemas es una forma científica de analizar y estudiar la realidad de modo sistemático y desde una perspectiva globalizadora, mediante el diseño de modelos que estudian las relaciones entre los elementos del sistema considerado

#### **Concepto de sistema**

Un **sistema** es un conjunto de partes o acontecimientos que son interdependientes entre sí e interaccionan, por lo que puede ser considerado como un todo sencillo, es decir, llamamos **sistemas** a los conjuntos compuestos de elementos que interactúan.

Un sistema, además puede estar formado por **subsistemas**, que son agrupaciones de varios componentes del sistema principal. Así el sistema Solar, compuesto por subsistemas (los planetas), integrados a su vez por otros subsistemas (núcleo, astenosfera, litosfera, atmósfera,...).

Un sistema es mayor que la suma de sus partes, denominándose **propiedades emergentes** a las que, sin estar presentes en los componentes separados, surgen del comportamiento global de todos ellos. Según estas propiedades, los componentes de un sistema están combinados para producir un conjunto funcional en el que surgen propiedades nuevas que no pueden ser previstas a partir del estudio de los componentes por separado. Así por ejemplo, las biomoléculas no tienen vida, pero sí la presentan las células resultantes de su asociación e interacciones.

Debido a esto, para estudiar y comprender un sistema no importa realmente el conocimiento detallado de cada uno de los componentes, sino las interacciones entre ellos que nos permitan conocer su funcionamiento global (visión sistémica).

La comprensión de los diversos procesos que afectan a la Tierra hace necesario utilizar un enfoque global, así no podemos comprender la dinámica de la litosfera sin comprender el interior terrestre o los problemas ecológicos globales, como el cambio climático, que surgen de interacciones entre la atmósfera, los océanos, ecosistemas y la litosfera.

#### **Componentes de un sistema**

Un sistema se puede considerar como una parte del Universo, aislada del resto, que consta de una serie de componentes que lo identifican y diferencian.

- a) **Componentes estructurales:** determinan la organización espacial del sistema.
- **Frontera:** límite real o imaginario que separa un sistema de su entorno. Algunos ejemplos son la membrana celular, la piel o la linde de un bosque. La frontera debe considerarse más como una zona de intercambio que como una barrera.
  - **Elementos:** son los constituyentes del sistema y que se pueden cuantificar, como las especies vegetales de un bosque. Un tipo especial de elementos son los depósitos, donde las reservas de los componentes que proporcionan materia, energía o información.
  - **Red de interacciones:** el conjunto de relaciones entre los componentes y depósitos del sistema que favorecen los intercambios de materia, energía o información. Las relaciones también se dan entre el sistema y el entorno.
- b) **Componentes funcionales:** son los procesos que desarrollan los componentes estructurales en un tiempo determinado.
- **Flujos:** muestran la circulación de materia, energía e información entre los componentes del sistema y suelen representarse mediante flechas.
  - **Válvulas:** son elementos que regulan los flujos, transforman la información recibida aumentando o disminuyendo el flujo.
  - **Bucles de alimentación:** son relaciones circulares que permitan al sistema autorregularse.

## Sistemas y termodinámica

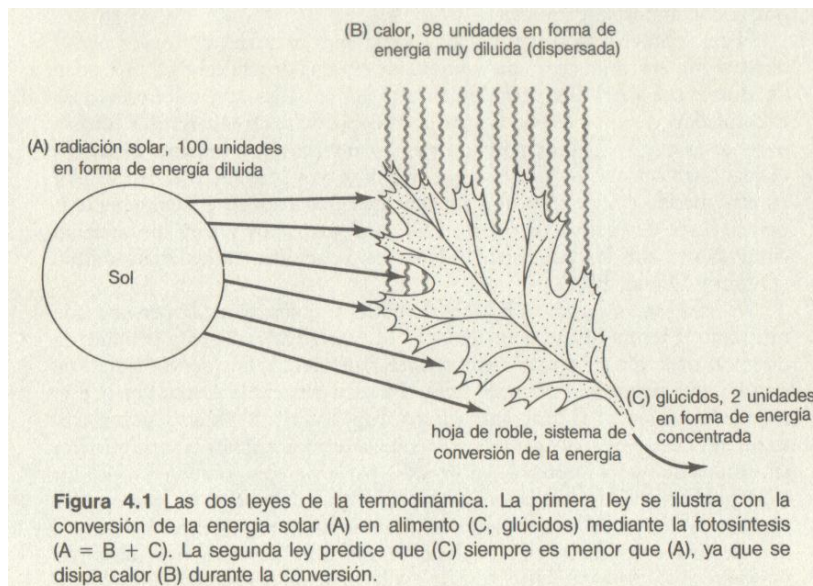
Las relaciones entre los componentes de un sistema consisten en flujos o intercambios de materia, energía o información, por lo que los sistemas han de cumplir las leyes de la termodinámica.

- **Primera ley de la termodinámica: conservación de la energía.** Ya sabemos que “la energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma”. Por ello, en todo sistema que modelemos, la energía que entre será equivalente a la energía almacenada en el sistema, más la energía que salga de él.

Como en cualquier conversión energética, cierta cantidad de energía se libera en forma de calor y, aunque no desaparece, se pierde a efectos prácticos pues no sirve para realizar un trabajo útil. Esto nos conduce al segundo principio de la termodinámica.

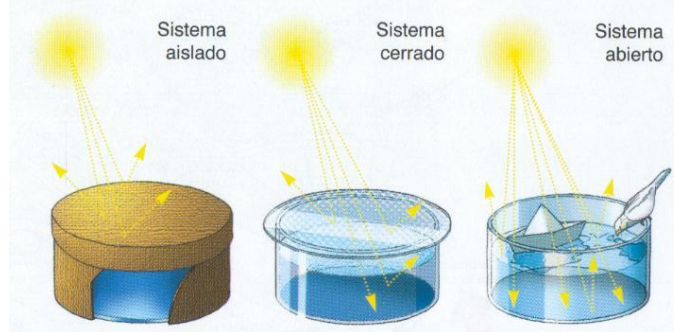
- **Segunda ley de la termodinámica: la entropía.** Se llama **entropía** a una medida de la incapacidad de realizar un trabajo. La segunda ley establece que, en cada transferencia, la energía se transforma y suele pasar de una forma más concentrada y organizada a otra más dispersa y menos organizada y que consecuentemente la entropía aumentará. Por ejemplo, un río en el curso alto posee una baja entropía, y una elevada energía potencial debido a su altura respecto al mar, por lo que podrá desempeñar un trabajo: erosión y transporte. A medida que el río desciende hacia el mar, disminuye su altitud respecto al nivel del mar y por tanto su energía potencial se va reduciendo y su entropía irá aumentando hasta alcanzar el valor máximo en la desembocadura, cuando el río ha consumido toda su energía y se produce exclusivamente la sedimentación.

La entropía está asociada al orden existente en un sistema. Cuanto mayor orden exista, más concentrada está la energía y más baja será la entropía. Por el contrario, si existe un mayor desorden, la energía estará más dispersa y la entropía será más elevada. Para mantener el orden en un sistema se necesita un aporte de energía. La tendencia natural del Universo es hacia un estado de máxima entropía, al máximo desorden, sin embargo los seres vivos se oponen a esa tendencia porque son sistemas ordenados, que consiguen mantener una baja entropía interior (mayor orden) degradando azúcares en la respiración y expulsando al entorno moléculas ( $\text{CO}_2$  y vapor de agua) de elevada entropía, así rebajan su entropía a costa de aumentar la del entorno.



### Tipos de sistemas según la termodinámica

- **Sistemas abiertos:** son aquellos en los que se produce un intercambio de materia y energía con el entorno. Recibe entradas del ambiente exterior y las modifica para producir salidas. Para continuar funcionando, los sistemas abiertos necesitan siempre nuevas entradas. Por ejemplo, en una ciudad entran energía y materiales y sale energía en forma de calor y materia en forma de desechos y productos manufacturados.
- **Sistemas cerrados:** son aquellos que intercambian energía con el entorno, pero no materia. Por ejemplo, en una charca entra energía solar y sale calor, pero la materia se recicla.
- **Sistemas aislados:** son aquellos en los que no existe intercambio de materia ni de energía con el entorno. Por ejemplo, el Sistema Solar formado por el Sol y sus planetas se considera un sistema aislado.



### Comportamiento de los sistemas abiertos

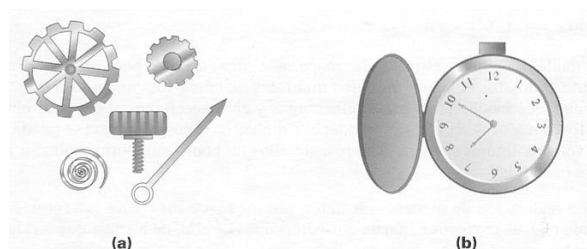
- Se mantienen ordenados debido al aporte continuo de energía, por lo que aumentan la entropía del entorno.
- Están sometidos a perturbaciones externas e internas que alteran su equilibrio inicial: el sistema tiende a alcanzar una nueva situación de equilibrio.
- Para comprender su comportamiento hay que conocer los valores de materia, energía o información que entran en el sistema (inputs), salen del sistema (outputs) y permanecen dentro del sistema

### Los enfoques reduccionista y holista

El estudio de un sistema, se puede realizar siguiendo dos enfoques:

- **Enfoque reduccionista (reduccionismo) o analítico:** intenta descomponer el objeto de estudio en sus componentes y estudiar cada uno por separado. Considera que únicamente se puede comprender un proceso cuando se conocen con exactitud todos los elementos que participan en el mismo, pero este método encuentra problemas al estudiar procesos complejos, como los seres vivos o los ecosistemas, ya que no logra explicar el funcionamiento del conjunto a partir del comportamiento de cada una de sus partes. (figura a)
- **Holismo:** considera que los procesos complejos sólo pueden comprenderse cuando se consideran globalmente, pues la totalidad del conjunto es mayor que la suma de las partes que lo componen. El enfoque holístico o sintético trata de conocer las relaciones entre los componentes de aquello que se quiere estudiar, aunque no se conozcan con detalle cada uno de ellos. (figura b)

Ambos enfoques no son excluyentes, sino complementarios, ya que cuando mejor conozcamos las diferentes partes mejor conoceremos el todo, resulta evidente que las Ciencias Medioambientales requieren un predominio del enfoque holístico, por ello la metodología más apropiada es la proporcionada por la Teoría General de Sistemas.

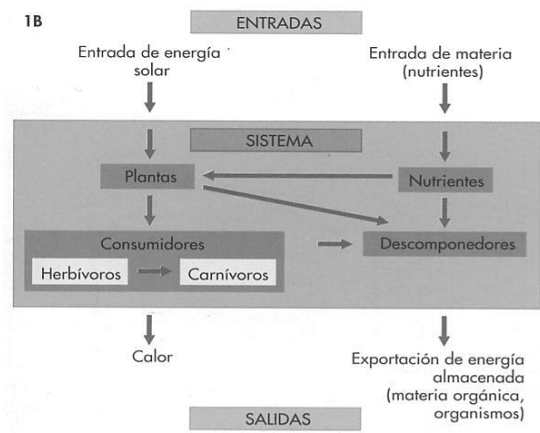
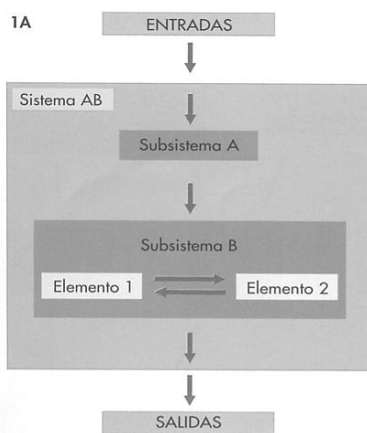
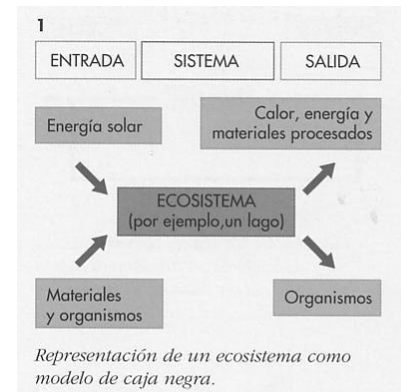


## Modelado de sistemas abiertos

- **Modelo de caja negra.** Un modelo de caja negra se representa como si fuera una caja dentro de la cual no queremos mirar y sólo fijarnos en sus entradas y salidas de materia, energía e información, es decir, en sus intercambios con el entorno. Para muchos de nosotros, la televisión es una caja negra que tiene entradas de ondas electromagnéticas, que transforma (no sabemos cómo) en imágenes y sonidos. Se trataría de un sistema abierto, porque si se cortan las entradas deja de funcionar.

- **Modelo de caja blanca.** Cuando observamos el interior de un sistema, nos estamos basando en un enfoque de caja blanca, y podemos ver cómo está organizado internamente y dilucidar qué ocurre con las entradas. Lo primero que tenemos que hacer es marcar las **variables** que lo componen y unirlos con flechas que las relacionen entre sí. Cada una de las variables se puede considerar como un subsistema del inicial y se puede diseñar como modelo de caja negra o blanca. La representación de todo ello, variables y flechas, es un **diagrama causal**.

En cualquier modelo que diseñemos, debemos tener cuidado de incluir solamente las variables necesarias, ya que, si aumenta mucho su número, se pierde claridad, debido al complejo entramado de relaciones entre dichas variables, y por tanto dicho modelo no nos serviría.



## Dinámica de sistemas: Relaciones causales

La dinámica de sistemas son los cambios que experimentan las variables de un sistema a lo largo del tiempo, esto hace que el sistema evolucione en el tiempo de modo global según el comportamiento de todo el conjunto de variables implicadas.

### Relaciones causales

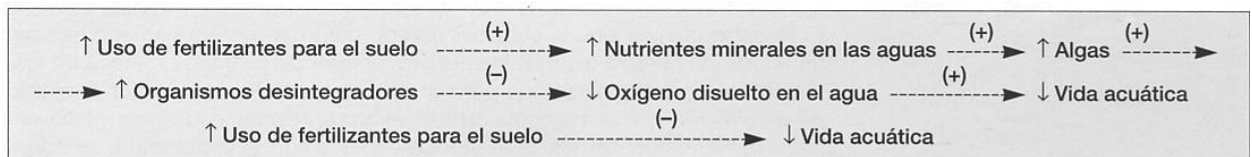
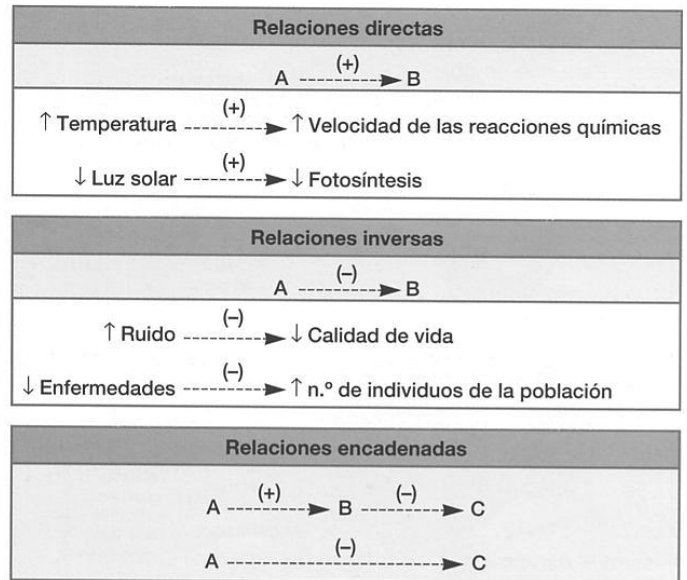
Las relaciones que mantienen entre sí las variables de un sistema son **causales**, es decir, una de las variables es la responsable de un efecto ejercido sobre otra. Estas relaciones se pueden representar mediante **diagramas causales**, en las que se incluyen los **elementos** de un sistema y **flechas** que conectan las variables consideradas al modelar un sistema.



**Tipos de relaciones**

**1. Relaciones simples:** son aquellas en que una variable A influye sobre otra B, pero no a la inversa. . Las relaciones simples pueden ser:

- **Directas o positivas:** cuando el incremento o disminución de A provoca el incremento o disminución de B. Se indica mediante un signo + sobre la flecha.
- **Inversas o negativas:** aquellas en el incremento de A implica la disminución de B, o viceversa. Se indican mediante un signo - sobre la flecha.
- **Encadenadas:** cuando el número de variables a considerar es mayor de dos, y se leen de forma independiente por parejas. Para simplificarlas se pueden reducir a una sola relación, contando el número de relaciones negativas existentes. Si es par, la relación resultante será positiva. Si es impar la relación resultante será negativa.



**2. Relaciones complejas:** son aquellas acciones en que una variable influye sobre otra u otras que, a su vez, influyen sobre la primera, como la pescadilla que se muerde la cola. El resultado es el establecimiento de un conjunto de relaciones causales encadenadas en círculo cerrado, que reciben el nombre de bucles de retroalimentación o feedback.

- **Retroalimentación positiva:** es aquella en la cual al incrementarse A se incrementa B, y viceversa. En general una retroalimentación positiva acelera un sistema o proceso. Se indica con un signo + dentro de un círculo situado en el centro de la relación.

Un ejemplo de retroalimentación positiva es el crecimiento exponencial de una población que no tenga limitaciones para reproducirse; al aumentar la población, habrá mayor número de nacimientos, que a su vez, incrementan la población, y así sucesivamente hasta que los recursos vitales se agoten.

- **Retroalimentación negativa:** se da en los casos en que al incrementarse A se incrementa B, pero el incremento de B hace disminuir a A. Las retroalimentaciones negativas retardan o mantienen un proceso en una tasa uniforme. Se indican mediante un signo - dentro de un círculo situado en el centro de la relación. Su denominación se debe a que, globalmente, la respuesta es negativa con relación al estímulo inicial, es decir, el exceso de un factor produce una inhibición y el defecto una excitación.

Un ejemplo típico es el de un sistema de calefacción controlada por termostato: si la temperatura baja, se enciende la calefacción, y si la temperatura es alta, se apaga.

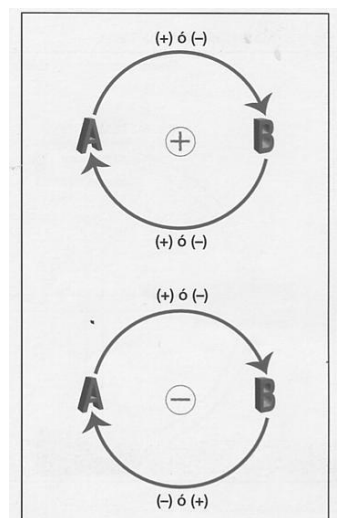
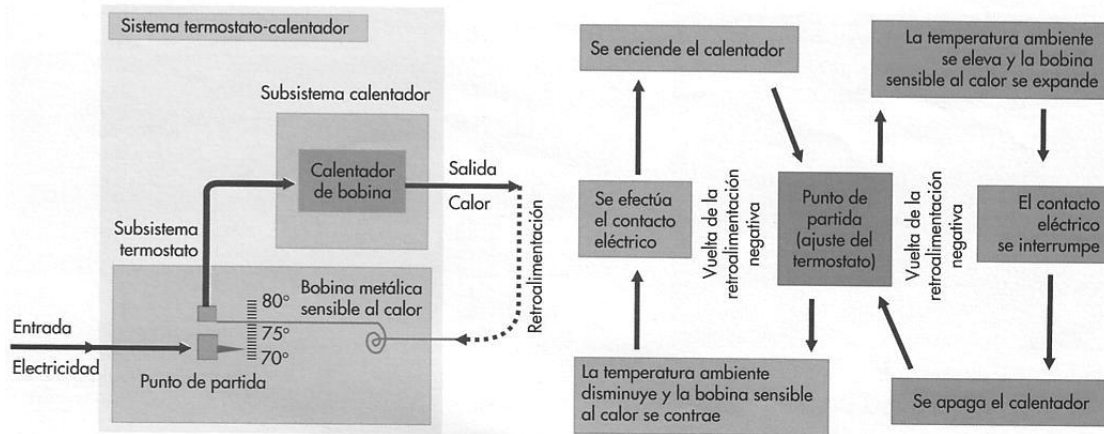


Fig. 1.7. Relaciones de retroalimentación positiva (arriba) y negativa (abajo).

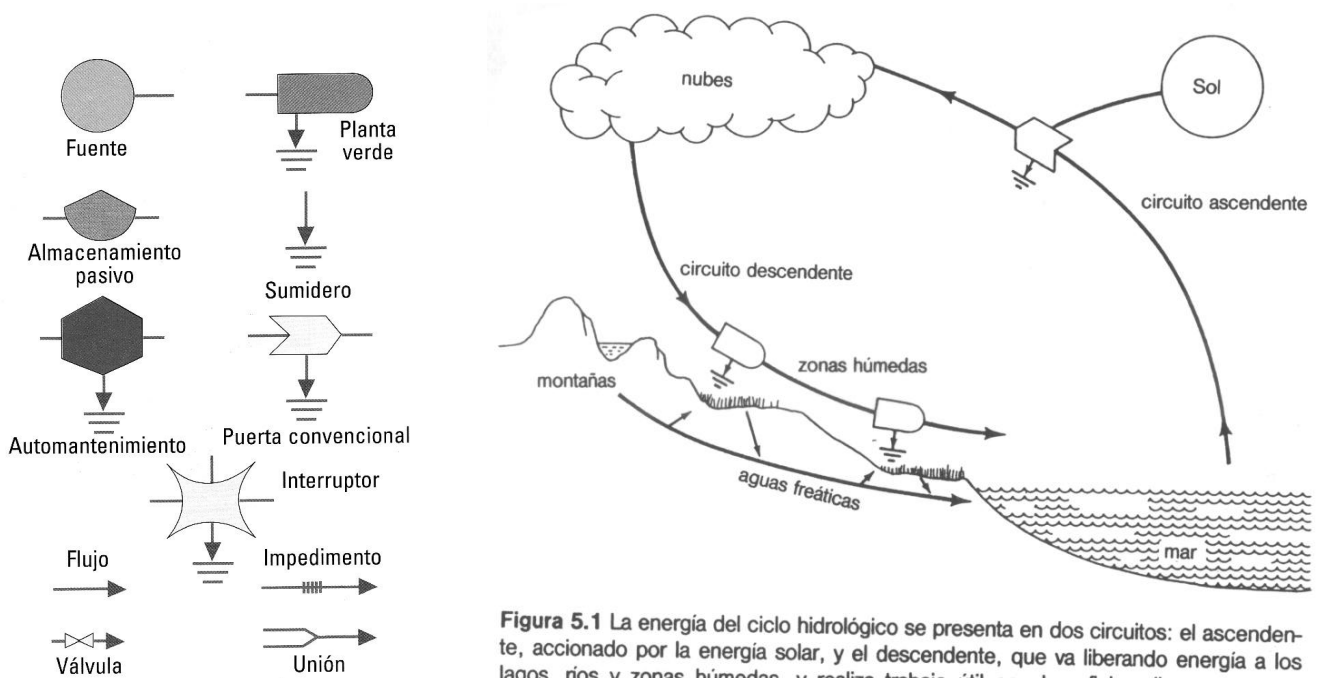
Los bucles de retroalimentación negativa tienen una acción reguladora y estabilizan los sistemas que los posee, los cuales recibes en nombre de **sistemas homeostáticos** o **cibernéticos**, como el sistema ABS, la dirección asistida, el piloto automático, etc.

- Un mecanismo de **retroalimentación negativa** determina el reajuste continuo del punto de partida, de forma que si el sistema se separa de esa referencia, por exceso o por defecto, el mecanismo de retroalimentación lo devuelve al estado inicial. Un ejemplo típico de sistema cibernético con retroalimentación negativa es el de un calentador con termostato.



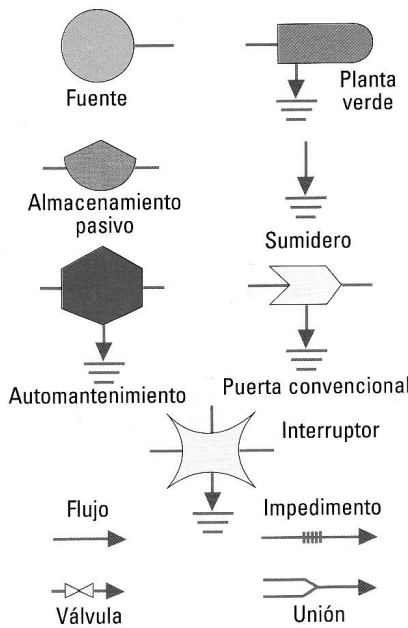
**Diagramas de flujo:** son representaciones de un algoritmo, que se utilizan principalmente en programación informática, y muestran la estructura de un proceso y cómo se relacionan entre sí cada una de sus etapas.

En ciencias de la Tierra destacan los diagramas de Forrester y los diagramas de Odum. Cada uno de ellos utiliza una simbología propia, y permiten la comprensión y simulación de sistemas. Los diagramas de Odum están adaptados a la comprensión de los ecosistemas.



**Figura 5.1** La energía del ciclo hidrológico se presenta en dos circuitos: el ascendente, accionado por la energía solar, y el descendente, que va liberando energía a los lagos, ríos y zonas húmedas, y realiza trabajo útil con beneficios directos para el hombre (por ejemplo energía hidroeléctrica).

*Símbolos del diagrama de Odum.*



### DIAGRAMA CAUSAL: Ejemplo de un modelo de sistema; la regulación a largo plazo de la temperatura superficial de la Tierra.

La temperatura superficial global depende de manera principal de la radiación solar pero el efecto invernadero producido por el  $\text{CO}_2$  y otros gases aumenta algunos grados la temperatura de la atmósfera. La emisión de radiación al espacio estabiliza la temperatura

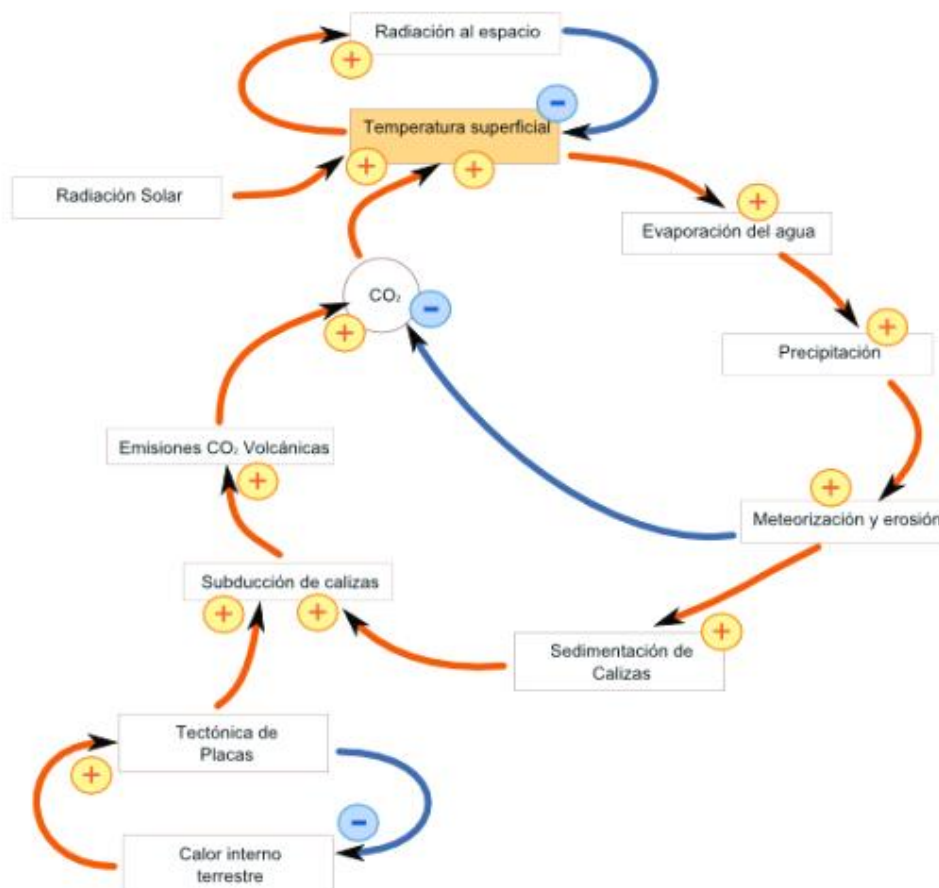
Si la temperatura de la Tierra se eleva aumenta la evaporación de agua y la consiguiente precipitación y meteorización y erosión de las rocas y sedimentos continentales. La carbonatación resta  $\text{CO}_2$  atmosférico y lo acumula en forma de sedimentos calizos. La disminución de  $\text{CO}_2$  rebaja la temperatura terrestre.

Si la temperatura de la Tierra baja disminuyen las precipitaciones y la meteorización de modo que no se consume en  $\text{CO}_2$  atmosférico. El carbono almacenado en las calizas vuelve a la atmósfera lentamente por el vulcanismo que se alimenta de los sedimentos calcáreos subducidos. Este aumento de  $\text{CO}_2$  aumenta la temperatura.

Estos procesos se producen a largo plazo, especialmente el aumento de  $\text{CO}_2$  por emisiones volcánicas.

La Tierra ha permanecido a una temperatura aproximadamente constante a pesar de el aumento de radiación solar desde su formación. salvo una época en el precámbrico de fuertes oscilaciones en las que parece que llegó a congelarse completamente la superficie de los océanos, siempre ha habido hidrosfera libre en el planeta.

#### Termostato terrestre

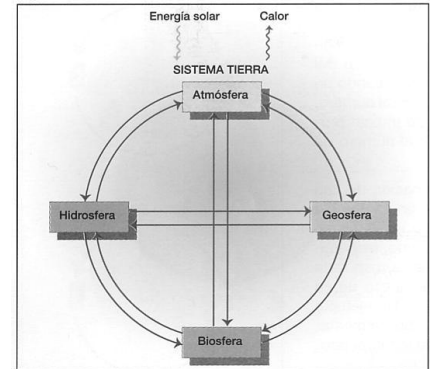


#### 4. EL SISTEMA PLANETA TIERRA

La **Tierra** se puede considerar como un **sistema abierto** que recibe un flujo continuo de energía en forma de radiación solar (radiación electromagnética) y de materia de los meteoritos y que emite al espacio calor (energía en forma de luz infrarroja). Se trata además de un sistema que autorregula su temperatura, manteniendo una media de unos 15 °C, lo cual permite la existencia de agua líquida y por tanto de vida.

Dentro del sistema terrestre se pueden diferenciar varios subsistemas naturales que interaccionan entre sí, son los siguientes:

Fig. 1.8. Modelo del sistema Tierra.



- **Atmósfera:** es la envoltura gaseosa de la Tierra, que se originó por desgasificación de las rocas durante la fusión del planeta primitivo. Su composición original debía ser muy diferente a la actual: sin oxígeno, con gran cantidad de nitrógeno y CO<sub>2</sub> y enormes cantidades de vapor de agua. Como veremos más adelante, la actividad fotosintética de los seres vivos cambiaría su composición de manera fundamental: apareció el oxígeno y se redujo la concentración de CO<sub>2</sub> por la fijación durante la fotosíntesis.

- **Hidrosfera:** es la capa discontinua de agua que envuelve la superficie sólida del planeta. Comprende fundamentalmente el agua líquida, continental y oceánica, y el hielo glaciar, aunque una pequeña cantidad forma parte de la atmósfera (vapor de agua) y de los seres vivos. La hidrosfera se originó por condensación del vapor de agua de la atmósfera al enfriarse el planeta. La acción de la energía solar sobre los océanos formados inició el ciclo del agua.

Como gran parte del CO<sub>2</sub> atmosférico pasaría debido a las precipitaciones a los océanos, en el agua oceánica reaccionaría con otros compuestos y daría lugar a las rocas carbonatadas como la caliza. Así la atmósfera se empobreció en CO<sub>2</sub>, mientras que el N<sub>2</sub>, menos reactivo e insoluble, quedaría como componente mayoritario.

- **Geosfera:** es la parte sólida del planeta, formada por un núcleo denso y metálico, un manto rocoso y una corteza de rocas más ligeras, debido a la diferencia gravitatoria de los materiales terrestres. Para nosotros presenta especial interés su parte más externa o litosfera, que comprende toda la corteza y parte del manto superior. La geosfera es una “esfera” dinámica, movida por la energía interna que permanece desde sus orígenes y la que se desprende de ciertos elementos radiactivos presentes en sus rocas internas. Esta energía interna es el motor de las placas litosféricas que en su desplazamiento a lo largo de la historia terrestre han provocado la fragmentación continental y la formación de nuevos continentes y océanos, hecho que ha repercutido como veremos en el clima del planeta y en la distribución de los seres vivos.

- **Biosfera:** está constituida por todos los seres vivos del planeta y ocupa la parte inferior de la atmósfera, una parte de la hidrosfera, y la parte superior de la litosfera. La vida se originó en los mares primitivos, ricos en compuestos orgánicos hace aproximadamente 3.500 m.a. Estos primeros organismos bacterianos fueron procariontes, heterótrofos y anaerobios y fueron evolucionando como consecuencia de procesos de mutación y selección natural, adaptándose a las cambiantes condiciones ambientales y cambiándolas en otros casos (ver hipótesis Gaia), hasta originar las actuales formas de vida.

Además de los subsistemas naturales, se pueden mencionar otros subsistemas de origen antrópico, creados a lo largo de la historia de la humanidad:

- **Tecnosfera:** es el conjunto de instrumentos y tecnologías ideados por el hombre para facilitar su desarrollo.

- **Sociosfera:** incluye todos los aspectos socioculturales y creativos debidos a las capacidades humanas.

- **Noosfera:** es el conjunto de ideas y conocimientos que gobiernan las relaciones del hombre y el medio, o entre los sistemas antrópicos entre sí. La noosfera o esfera de la razón fue propuesta por Vernadsky, padre de la biogeoquímica moderna, y sería por tanto el resultado de la acción de la inteligencia, del pensamiento científico y del trabajo humano sobre la biosfera. Esta “envoltura” gobernada por la inteligencia humana, ocuparía el lugar de la biosfera.

## Las relaciones entre los subsistemas terrestres

Las interacciones entre todos estos subsistemas terrestres tiene como resultado la regulación del clima, de modo que el sistema Tierra puede considerarse como un **sistema climático**, así pues las “capas” que componen la Tierra no son entidades aisladas sino que funcionan como un todo. Algunas de las interacciones entre los subsistemas terrestres se exponen a continuación.

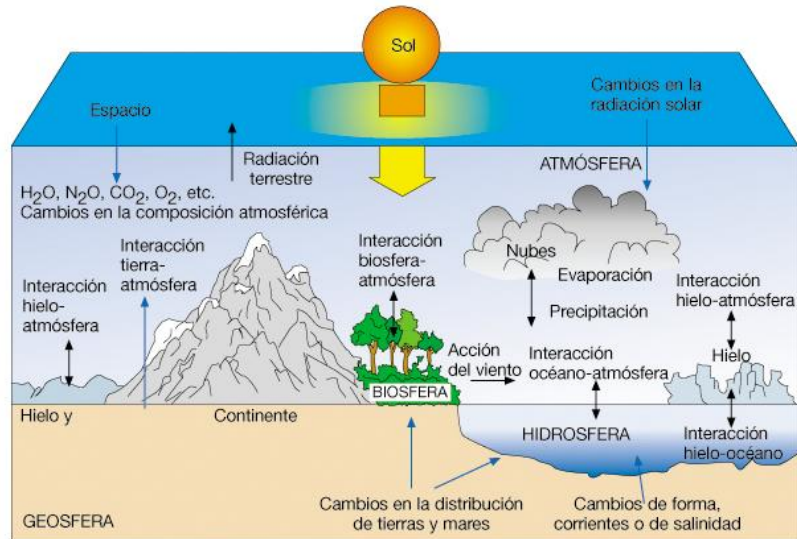


Fig. 1.32. Modelo del clima según el Programa Global de Investigación Atmosférica. Es un sistema en equilibrio dinámico: cualquier cambio en uno de sus componentes requerirá un cambio de los demás para restablecer dicho equilibrio.

### La atmósfera en el sistema Tierra

Una de las principales acciones de la atmósfera es modular la energía procedente del Sol y regular la temperatura del planeta. Algunos gases presentes en la atmósfera, como el CO<sub>2</sub>, atrapan parte de la radiación de onda larga emitida por la superficie terrestre, contribuyendo al **efecto invernadero**, que permite mantener la superficie terrestre en torno a los 15 °C. Además la circulación atmosférica contribuye a distribuir el calor, desde las zonas ecuatoriales, más calentadas, hacia zonas de latitudes más altas.

Los fenómenos climáticos, como las olas, corrientes marinas y precipitaciones son consecuencia de la dinámica atmosférica.

La atmósfera además ejerce una influencia directa sobre las rocas superficiales, ya que mediante la meteorización y los fenómenos meteorológicos (lluvia, nieve, etc.) contribuyen a modelar el relieve.

Respecto a la biosfera, la atmósfera filtra radiaciones nocivas (como las ultravioleta), modera la temperatura y permite la presencia de agua líquida, fundamental para que exista vida y aporta los gases que se intercambian en la respiración y en la fotosíntesis.

### La hidrosfera en el sistema Tierra

La hidrosfera, en colaboración con la atmósfera tiene un papel esencial en la regulación térmica del planeta, gracias al elevado calor específico del agua (amortigua variaciones bruscas de temperatura), a las corrientes marinas que redistribuyen el calor hacia zonas frías y a la reflexión de las radiaciones solares por las masas de hielo glaciar.

Además el agua que circula por la superficie terrestre procedente de las precipitaciones modela el relieve: disuelve y disgrega materiales, los transporta y los sedimenta.

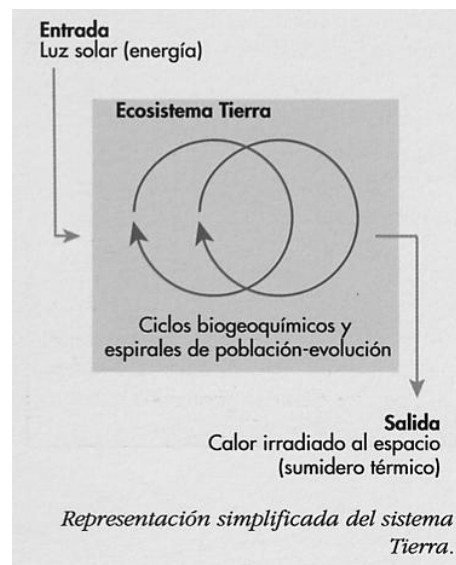
Por último, el agua es fundamental para la biosfera, puesto que los seres vivos mayoritariamente somos agua, aporta además diversos hábitats (ríos, humedales, mares,..) y mantiene la temperatura global en los márgenes adecuados para el desarrollo biológico.

**La geosfera en el sistema Tierra**

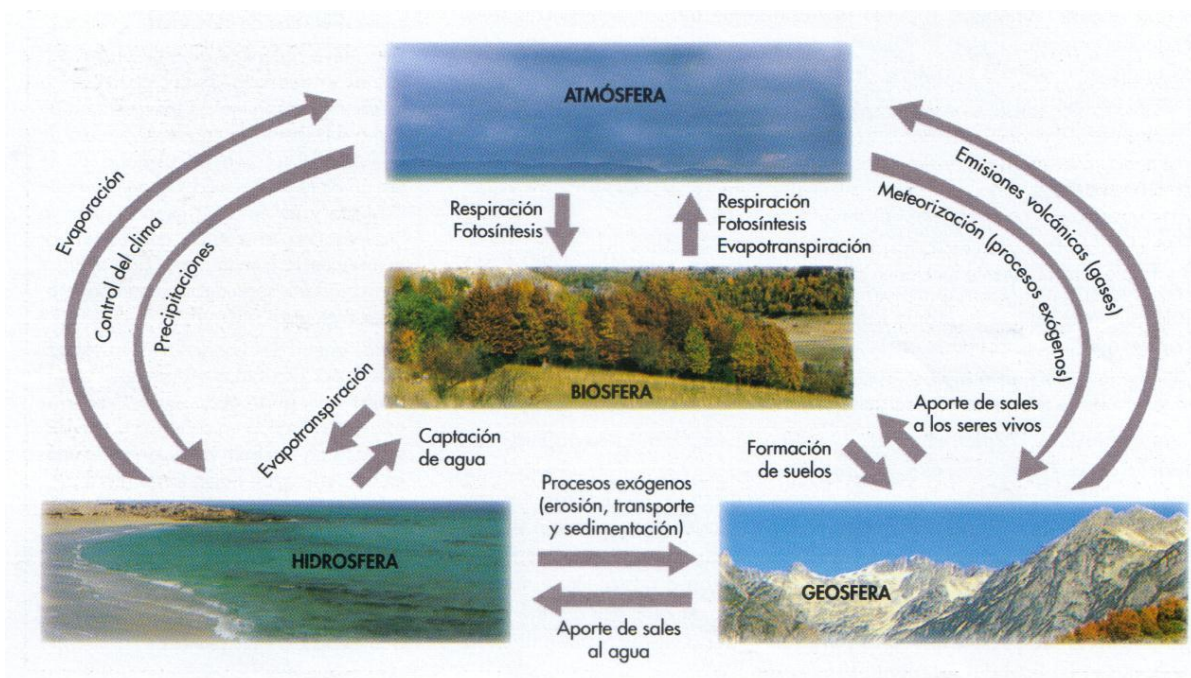
La dinámica interna de la Tierra repercute en la superficie terrestre (creación de cordilleras, fenómenos tectónicos, etc.) y tiene efectos sobre otros sistemas. Por ejemplo, las erupciones volcánicas liberan gases que modifican localmente la composición atmosférica y calientan el agua subterránea próxima a las cámaras magmáticas. Además, es fundamental en la formación de los suelos, el sustrato donde se asientan los seres vivos y en el aporte de minerales necesarios para el desarrollo vegetal.

La distribución de las masas continentales debida a la tectónica de placas a lo largo de la historia de la Tierra ha producido cambios en los océanos y, por ende, en el clima.

Por último, los ciclos biogeoquímicos, representan un excelente ejemplo de las interacciones entre todos los sistemas terrestres, ya que elementos como el carbono o el nitrógeno circulan por el agua, los seres vivos, las rocas y el aire, formando parte de moléculas que permanecen estables durante cierto tiempo en cada lugar.



Representación de las interacciones entre los sistemas terrestres



### La biosfera en el sistema Tierra. La hipótesis Gaia

Las primeras formas de vida en la Tierra aparecieron después de que se formaran definitivamente la hidrosfera y la atmósfera, y en unas condiciones físico-químicas que fueron adecuadas para mantener moléculas orgánicas. La aparición de los organismos fue uno de los acontecimientos esenciales en la evolución del planeta, pues ha condicionado la composición, estructura y la dinámica de las capas fluidas (atmósfera e hidrosfera), así como de la superficie de la geosfera.

Algunos autores, principalmente **James Lovelock**, han desarrollado un modelo de Tierra conocido como "**hipótesis Gaia**", en alusión a la diosa griega Gaia (Madre Tierra). Según este modelo, la Tierra es un superecosistema con numerosas funciones que interactúan, y con mecanismos de retroalimentación, que moderan las temperaturas extremas y mantienen constante la composición química de la atmósfera y de los océanos. En palabras de Lovelock, "la biosfera es una entidad autorregulada con capacidad para mantener a nuestro planeta sano mediante el control físico-químico", es decir, que la vida en su conjunto ejerce una acción global que contribuye a mantener sobre el planeta las condiciones adecuadas para su desarrollo, reaccionando ante los desequilibrios y transformando activamente el planeta. Esta visión contrasta con la tradicional, que analiza el fenómeno de la vida como el resultado de unas condiciones excepcionales que permitieron su desarrollo y evolución.

Muchos científicos son escépticos respecto a que los ecosistemas y la biosfera realmente funcionen como un sistema cibernético, aunque la mayoría acepta que los seres vivos desempeñan un papel en el control químico de la atmósfera y de los océanos.

La hipótesis Gaia se apoya en algunos argumentos interesantes, entre los que destacan:

- a) La biosfera regula la concentración de oxígeno atmosférico mediante la respiración y la fotosíntesis. La concentración del 21% es la ideal para la existencia de los árboles y de otras muchas especies.
- b) La composición química de la atmósfera terrestre (79% de  $N_2$ ) es anómala respecto a la de Venus (1,7% de  $N_2$ ) y Marte (2,7% de  $N_2$ ). Cabría esperar que el nitrógeno formara un compuesto más estable, que no el  $N_2$ , sino el ión nitrato ( $NO_3^-$ ). La conversión de nitrato en nitrógeno gaseoso es un proceso que necesita un gasto de energía, lo cual requiere la presencia de vida. Además Marte y Venus tienen atmósferas cercanas al estado de equilibrio, solo con gases oxidantes ( $O_2$  y  $CO_2$ ) e inertes ( $N_2$  y Ar). Por el contrario en la Tierra, la atmósfera está en un estado de desequilibrio, con gases oxidantes y reductores ( $CH_4$  y  $H_2$ ) presentes en una mezcla altamente reactiva, que no sería así si no hubiera vida.
- c) La temperatura media de la Tierra a través del tiempo se ha mantenido constante, a pesar de que el Sol ha ido aumentando en luminosidad, y por lo tanto ha ido emitiendo más energía. Solamente se puede explicar haciendo intervenir un sistema controlador como la biosfera.
- d) Los gases atmosféricos tienen un origen principalmente biótico, y la constancia de sus concentraciones se ha mantenido por mecanismos sensores y de control dentro de la biosfera.

Vamos a estudiar dos acontecimientos en la historia de la Tierra marcados por la aparición de los seres vivos en el planeta, como fueron los cambios en la composición atmosférica y oceánica.

La atmósfera primitiva tenía una composición química muy diferente a la actual, estaba formada por gases del tipo  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$  y  $H_2O$ , por lo que era una atmósfera reductora que carecía de oxígeno libre ( $O_2$ ). Una de las principales causas que provocó un cambio en su composición química fue la aparición, hace 2.000 millones de años, de los primeros seres vivos fotosintéticos (cianobacterias) que realizaban una fotosíntesis oxigénica, es decir, que desprendían oxígeno. La liberación de  $O_2$  tuvo una serie de consecuencias extremadamente importantes:

- Transformación del carácter reductor de la atmósfera en oxidante.
- Aparición de organismos aerobios capaces de sobrevivir en una atmósfera oxidante.
- Formación de la capa de ozono en la estratosfera, que filtra la radiación ultravioleta, posibilitando el desarrollo de la vida fuera del agua e impide la síntesis abiótica de materia orgánica.

Los océanos primitivos eran también reductores y ricos en compuestos orgánicos de origen abiótico que servía de alimento a las primitivas bacterias. La aparición de organismos fotosintéticos en el agua provocó la transformación del ambiente reductor en un ambiente oxidante, lo que determinó el fin de la síntesis abiótica de materia orgánica y un cambio en su composición química.

## **Evolución histórica del sistema Tierra**

### **La Tierra en el Hádico (4.600 – 3.800 m.a.)**

La idea más aceptada actualmente es que la Tierra se formó hace unos 4.600 m.a. por acreción de planetesimales. Este proceso aportó los materiales que forman la Tierra, entre ellos los gases atmosféricos, que se fueron liberando y acumulando a partir de la bola fundida que era la Tierra primitiva.

La protoatmósfera era muy distinta a la actual, ya que carecía de oxígeno, y en cambio contenía gases como hidrógeno (H<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y sulfuro de hidrógeno (SH<sub>2</sub>), era por tanto, una atmósfera reductora.

Hace unos 3.960 m.a. cesó el impacto de meteoritos, lo que permitió la aparición de una corteza terrestre estable. Esta corteza estaba formada por múltiples placas (más pequeñas que las actuales placas tectónicas) que chocaban entre sí originando la denominada tectónica de microplacas. Con el cese de meteoritos el planeta se fue enfriando, y al enfriarse la atmósfera, el vapor de agua que contenía procedente del vulcanismo se condensó, precipitando en forma de lluvia y formando la hidrosfera.

La repetición del ciclo lluvia- evaporación aceleró el enfriamiento del planeta, hasta que la superficie la Tierra alcanzó una temperatura que permitía la existencia del agua líquida.

### **La Tierra en el Arcaico (-3.800 -2.500 m.a) y Proterozoico (-2.500 – 540 m.a)**

Hace entre 3.700 y 3.500 m.a surgieron las primeras formas de vida, lo que supuso un acontecimiento crucial en la historia del planeta, especialmente de la atmósfera primitiva, ya que surgieron los primeros organismos fotosintéticos oxigénicos, las cianobacterias, que empezaron a liberar oxígeno, que se acumuló en los océanos, y cuando estos se saturaron, pasó a la atmósfera, hace unos 2.000 m.a.

La evolución de la vida condujo a la aparición de las células eucariotas, hace unos 1.400 m.a., lo que permitió la diversificación de los seres vivos.

Hace aproximadamente 1.000 m.a. los continentes se unieron en una única masa continental, Rodinia. La creación de este supercontinente provocó cambios en las corrientes marinas, que alteraron el reparto de calor en el planeta, provocando un desequilibrio del sistema Tierra que condujo a una disminución de la temperatura y a una intensa glaciación hace 700 m.a. (período criogénico), que coincide con la primera gran extinción documentada en el registro fósil.

Millones de años después la acumulación de CO<sub>2</sub> de origen volcánico en la atmósfera aumentó el efecto invernadero, desapareciendo los hielos. A finales del proterozoico surgen los primeros organismos pluricelulares de cuerpo blando, conocidos como fauna de Ediacara., coincidiendo con la ruptura de Rodinia.

### **La Tierra en el Paleozoico (-540 m.a. – 250 m.a.)**

La fragmentación de Rodinia supuso una gran diversificación de los seres vivos, al generar multitud de nuevos hábitats, consecuencia también de reajustes del clima. El aumento de la biodiversidad animal que tuvo lugar hace 570 m.a. recibe el nombre de explosión cámbrica, y en ella aparecieron todos los planes de organización corporal que hoy día forman los diferentes filos del reino animal. Además durante el Paleozoico, las plantas, artrópodos, anfibios y reptiles colonizaron el medio terrestre.

Hace unos 255 m.a. los continentes se volvieron a unir, formando un supercontinente, denominado Pangea, que coincide con la mayor extinción del Pérmico, la mayor de toda la historia, en ella desaparecieron el 96% de las especies marinas y el 70% de las especies de vertebrados terrestres.

### **La Tierra en el Mesozoico (-250 m.a. – 65 m.a.)**

Pocos millones de años después de la formación de Pangea, este supercontinente empezó a fragmentarse, originando los continentes y océanos actuales. Su fragmentación debido a los movimientos de las placas tectónicas estuvo asociada a una intensa actividad volcánica que liberó mucho CO<sub>2</sub>, que pasó a la atmósfera y favoreció el efecto invernadero, provocando el período más cálido del clima durante el Jurásico



(hace entre 199 y 145 m.a.), y un período de gran aridez, donde los helechos y anfibios fueron sustituidos por gimnospermas y reptiles respectivamente. Por eso, el Mesozoico se caracteriza por el dominio de los reptiles, que colonizaron todos los medios: el terrestre (dinosaurios), aéreo (pterosaurios) y acuático (ictiosaurios).

Además, la fragmentación de Pangea por la actividad volcánica de las dorsales provocó una importante subida del mar, quedando la mitad de los continentes inundados, sobre los que se depositaron importantes capas de calizas y se originaron los actuales yacimientos de petróleo.

A finales del Mesozoico se produjo la extinción del límite K-T (Cretácico-Terciario), causada por el impacto de un gran meteorito en el Golfo de México, lo que enfrió el clima, y provocó la extinción de los dinosaurios.

### **La Tierra en el Cenozoico (-65 m.a.-Actualidad)**

La última era geológica abarca los períodos terciario y cuaternario hasta la actualidad. Durante el terciario los continentes continuaron dispersándose y empezaron a colisionar hasta producir la orogenia Alpina, durante la cual se elevaron los Alpes, Pirineos y el Himalaya.

Tras la gran extinción de finales del Mesozoico, la vida se recuperó y los mamíferos y angiospermas comenzaron a dominar el medio terrestre y las aves el medio aéreo.

A lo largo del Cuaternario se produjeron varias glaciaciones, extendiéndose casquetes de hielo por los continentes del hemisfero norte, debidas a variaciones en la órbita terrestre (períodos de mayor excentricidad e inclinación de eje de rotación favorecen las glaciaciones). A lo largo de los últimos dos millones de años se han registrado 18 pulsaciones glaciares, separadas por períodos interglaciares más cortos, que han provocado repetidas bajadas y subidas del nivel del mar de hasta 150 m.

Hace 2 m.a. surgió el género Homo, en cuyo seno aparecería nuestra especie, Homo sapiens, hace unos 130.000 años.

### **Cambios en el medio ambiente a lo largo de la historia de la Tierra**

#### **1) Desde el punto de vista astronómico la Tierra a penas ha cambiado.**

- Su periodo de traslación, y masa, son prácticamente iguales.
- La rotación se ha ralentizado algo como consecuencia de de la atracción lunar, y la Luna se ha ido alejando y disminuyendo la intensidad de las mareas, pero estos efectos no han sido muy importantes.
- La radiación solar ha ido aumentando entre un 10 a un 30% menor al inicio que ahora.
- Impactos de meteoritos han ido disminuyendo desde el periodo Hádico.

#### **2) Desde el punto de vista tectónico la Tierra siempre ha sido activa por el calor interno**

- El ritmo de la tectónica de placas ha sido parecido desde los últimos 3000 millones de años, es posible que antes fuera diferente.
- La corteza continental terrestre tuvo un periodo de formación importante hace 3500 a 4000 millones de años.
- Siempre parece haber tenido un campo magnético importante.

#### **3) La hidrosfera apareció desde los primeros momentos de formación del planeta por destilación interna e impactos cometarios.**

- Su composición en sales ha variado especialmente debido al ambiente más o menos reductor. Antes FeO solubles, ahora materia orgánica en forma de seres vivos y restos.
- Cambios de nivel importantes a escala planetaria aunque no por cantidad de agua sino por distribución.
- Muchas dorsales activas, mares menos profundos, invasión de la superficie continental.
- En periodos glaciares disminución de nivel del mar por hielo en los continentes.

**4) La atmósfera ha cambiado considerablemente**

- No está clara la composición inicial pero seguro que no O<sub>2</sub>, mayoritariamente N<sub>2</sub> y bastante CO<sub>2</sub> se discuten otros gases
- El O<sub>2</sub> es de origen biológico y ha ido aumentando a lo largo del tiempo. Posible máximo en el carbonífero. Puede que parte del N<sub>2</sub> sea de origen biológico
- El secuestro de CO<sub>2</sub> tienen importancia las plantas y los organismos con esqueleto calcáreo

**5) La temperatura superficial se ha mantenido dentro de unos márgenes estrechos, pero ha habido cambios globales y de distribución**

- Periodos glaciares en el precámbrico, carbonífero y actual
- Aislamiento térmico del polo sur en la actualidad en otros periodos menos fríos

**6) Las formas de vida han cambiado considerablemente**

- Cianobacterias y plantas han producido O<sub>2</sub> y consumido CO<sub>2</sub> atmosférico
- Plantas superiores disminuyen considerablemente el ritmo de erosión continental. Es posible que modificaran el albedo
- Microorganismos marinos y corales forman depósitos calcáreos

**7) Seres humanos han cambiado considerablemente el planeta en un periodo muy corto**

- Disminución de la biodiversidad
- Aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico
- Deforestación y contaminación

CUADRO I Principales acontecimientos en la historia de la Tierra		
Era (Ma transcurridos)	Climas y principales fenómenos geológicos	Formas de vida
Precámbrico * (4600 - 570)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variable de seco y frío a cálido y húmedo. En el Proterozoico, las primeras glaciaciones confirmadas.</li> <li>- Formación de la litosfera, de los océanos y de la atmósfera primitivos. Transformación del ambiente reductor a oxidante. Formación de la Pangea I e inicio de su fragmentación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Origen de la vida.</li> <li>- Aparición y diversificación de organismos unicelulares, procariontes y eucariontes.</li> <li>- Aparición de los seres pluricelulares.</li> </ul>
Paleozoico (570 - 230)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variable, de suave a cálido, con dos glaciaciones.</li> <li>- Se sigue fragmentando la Pangea I, produciéndose una serie de placas que irán colisionando, con los consiguientes procesos orogénicos. Al final de la era, formación de la Pangea II.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diversificación de la biosfera (explosión cámbrica), con un gran desarrollo de los invertebrados marinos con caparzones.</li> <li>- Aparición y desarrollo de peces y anfibios.</li> <li>- Aparición de las plantas terrestres, con enorme desarrollo de helechos de gran porte y plantas afines.</li> <li>- Primeros reptiles.</li> <li>- Extinción del Pérmico, la mayor conocida.</li> </ul>
Mesozoico (230 - 65)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Clima homogéneo y caluroso.</li> <li>- Situación globalmente anorogénica, de distensión y fragmentación de la Pangea II.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Renovación de flora y fauna, tras la extinción pérmica: las gimnospermas desplazan a los helechos y los reptiles a los anfibios.</li> <li>- Aparición de las angiospermas y de los mamíferos y las aves.</li> <li>- Extinción masiva en el Cretácico.</li> </ul>
Cenozoico (65 - actualidad)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El clima evoluciona hacia condiciones más frías y áridas. El periodo cuaternario se caracteriza por la alternancia de épocas glaciares e interglaciares.</li> <li>- Los continentes van adoptando progresivamente su configuración actual y, como consecuencia de los consiguientes procesos orogénicos, se forman los grandes relieves actuales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Expansión de mamíferos y aves.</li> <li>- Expansión de las angiospermas.</li> <li>- Aparición de los homínidos y expansión planetaria de <i>Homo sapiens</i>.</li> </ul>

\* Nota: Precámbrico es un término que engloba todas las épocas anteriores al Cámbrico.

Era	Período	Época	M. años	Eventos principales
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	0,011784	Final de la Era de Hielo y surgimiento de la civilización actual
		Pleistoceno	2,588	Ciclos de glaciaciones. Evolución de los humanos modernos. Extinción de la megafauna
	Neógeno	Plioceno	5,332	Formación del Istmo de Panamá. Capa de hielo en el Ártico y Groenlandia. Clima similar al actual. Australopitecos
		Mioceno	23,03	Desecación del Mediterráneo. Reglaciación de la Antártida
	Paleógeno	Oligoceno	33,9 ± 0,1	Orogenia Alpina (Pirineos, Alpes e Himalaya). Formación de la Corriente Circumpolar Antártica. Brusco descenso de las temperaturas. Congelación de la Antártida. Familias modernas de animales y plantas
		Eoceno	55,8 ± 0,2	India colisiona con Asia. Máximo térmico del Paleoceno-Eoceno. Disminución del dióxido de carbono. Extinción de final del Eoceno
		Paleoceno	65,5 ± 0,3	Continentes de aspecto actual. Clima uniforme, cálido y húmedo. Florecimiento animal y vegetal

Millones de años	Eón	Era	Período	Época	Ciclos orogénicos
2	Fanerozoico	CENOZOICO	Cuaternario	Holoceno	Alpino
				Pleistoceno	
Neógeno			Plioceno		
			Mioceno		
Paleógeno			Oligoceno		
			Eoceno		
65		Mesozoica o Secundaria	Cretácico	Superior	
				Inferior	
			Jurásico	Malm	
				Dogger	
				Lias	
			Triásico	Superior	
Medio					
225	Paleozoica o Primaria	Pérmico	Superior	Hercínico	
			Inferior		
Carbonífero		Superior			
		Inferior			
Devónico		Superior			
		Medio			
Silúrico		Superior	Caledoniano		
		Inferior			
Ordovícico		Superior			
		Inferior			
Cámbrico		Superior			
		Medio			
570	Proterozoico	Precámbrica		Algónquico	Huroniano
2500	Criptozoico				
4500					

**ACTIVIDADES SOBRE EL CONCEPTO DE MEDIO AMBIENTE**

1. Elabora tu propia definición de **medio ambiente** a partir de las definiciones de la Tabla.

DEFINICIONES DE MEDIO AMBIENTE	
Conferencia de Estocolmo (1972)	Conjunto de elementos físicos, químicos, biológicos y de factores sociales capaces de causar efectos directos o indirectos, a corto o largo plazo, sobre los seres vivos y las actividades humanas.
Coloquio de Aix-en-Provence (1972)	Conjunto de seres y cosas que constituyen el espacio próximo o lejano del hombre, sobre los que puede actuar, pero que recíprocamente pueden actuar sobre él y determinar total o parcialmente su existencia y modos de vida.
Constitución española (1978) (síntesis)	Conjunto de recursos naturales (aire, agua, suelo, fauna, flora) por cuya utilización racional deben velar los poderes públicos, incluyendo, además, la relación que el hombre establece con dichos elementos.
Directiva Comunidad Económica Europea 85/377 (1985)	Es el sistema constituido por el ser humano, la fauna y la flora; el suelo, el aire, el clima, y el paisaje; las interacciones entre los factores citados, los bienes materiales y el patrimonio cultural.
María Novo (1986)	Es el sistema constituido por factores naturales, culturales y sociales, interrelacionados entre sí, que condicionan la vida del hombre a la vez que constantemente son modificados y condicionados por él.

Tabla I

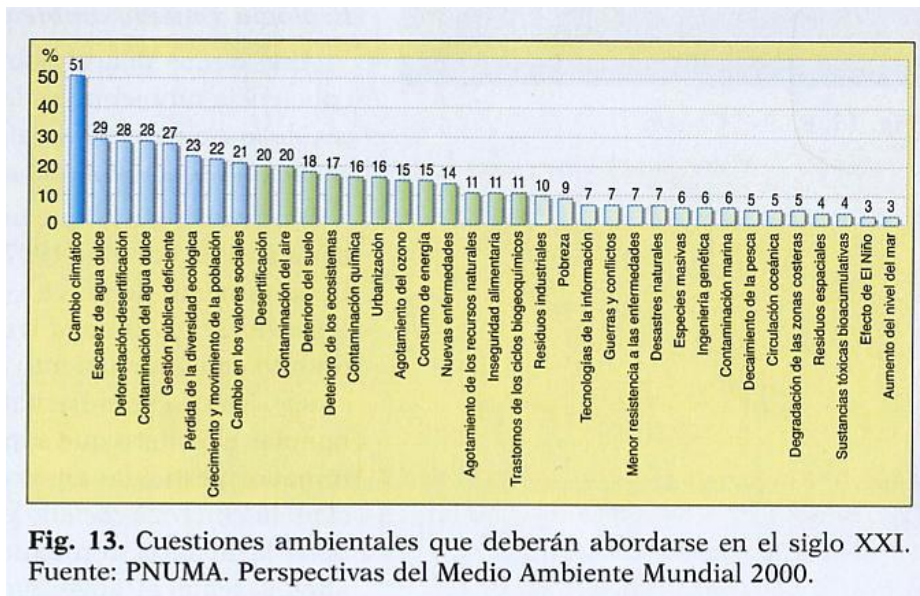
- Albert Sasson define medio ambiente como “una compleja red de factores físicos, bióticos y socioculturales, interactuando en situaciones sistémicas mediante flujos de energía, materia e información”. ¿Qué aspecto novedoso presenta esta definición con respecto a las anteriores?
- Relaciona cada enfoque del concepto de medio ambiente con el aspecto predominante en su definición. Justifica cada relación.

Enfoque	Aspectos dominantes
1. Urbanístico	a) Consecuencias de las acciones humanas
2. Consumista	b) Espacio humanizado
3. Sociológico	c) Costes de la gestión de recursos
4. Ambientalista	d) Efectos derivados de la utilización de los medios
5. Tecnológico	e) Estéticos y recreativos
6. Económico	f) Conjunto humano
7. Artístico	g) Fuente de recursos

4. Los siguientes nombres pertenecen a lugares, cosas o afirmaciones que deberás señalar con una cruz en una de las columnas según lo de acuerdo que estés con las afirmaciones:

Forman parte de mi Medio Ambiente:	Seguro que Sí	Probable	Creo que NO	Seguro que NO
Un Volcán				
Un bosque tropical				
La Unión Europea				
Las pirámides de Egipto				
La Capa de ozono				

5. El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) publica anualmente un informe que sintetiza la evaluación del medio ambiente elaborada por el proyecto Perspectivas del Medio Ambiente Mundial, iniciado en 1995. Uno de los capítulos se dedica a indicar cuestiones ambientales prioritarias en el siglo XXI a partir de las encuestas realizadas a 200 científicos de 50 países. (fig 13).
- ¿Cuál de estos problemas ambientales es el principal de nuestro país? ¿Y de nuestra región? ¿Por qué?
  - ¿Qué opinas sobre la relevancia que dan los científicos al cambio climático frente a otros problemas ambientales?
  - Teniendo en cuenta la relación de problemas ambientales presentados en la fig. 13, elabora tu propia lista indicando por orden de importancia cuáles son para ti los cinco problemas prioritarios. Justifica brevemente tu elección.



### ACTIVIDADES SOBRE MODELOS Y TEORIA DE SISTEMAS

6. Supón que la población de la Tierra aumenta según una tasa de crecimiento neto de 2 anualmente, y considera que actualmente hay 6400 millones de habitantes.

Con estos datos predice cuántos millones seremos dentro de 20 años para la tasa actual y para tasas la mitad (1) y la cuarta parte (0,5) de la actual.

El modelo que se puede aplicar está recogido en la ecuación del crecimiento de las poblaciones:

$$N_t = N_0 R^t$$

R : tasa de crecimiento neto

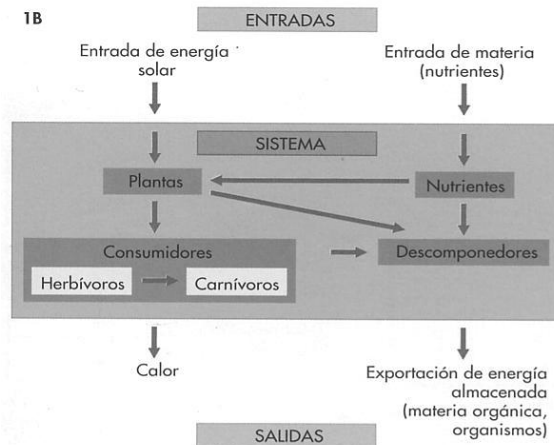
t: tiempo en años

$N_0$  : población inicial

$N_t$  : población al cabo de t años

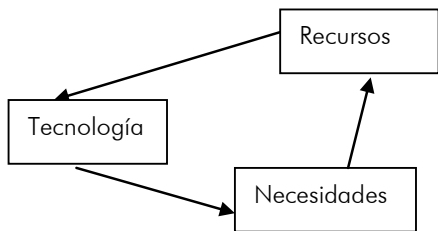
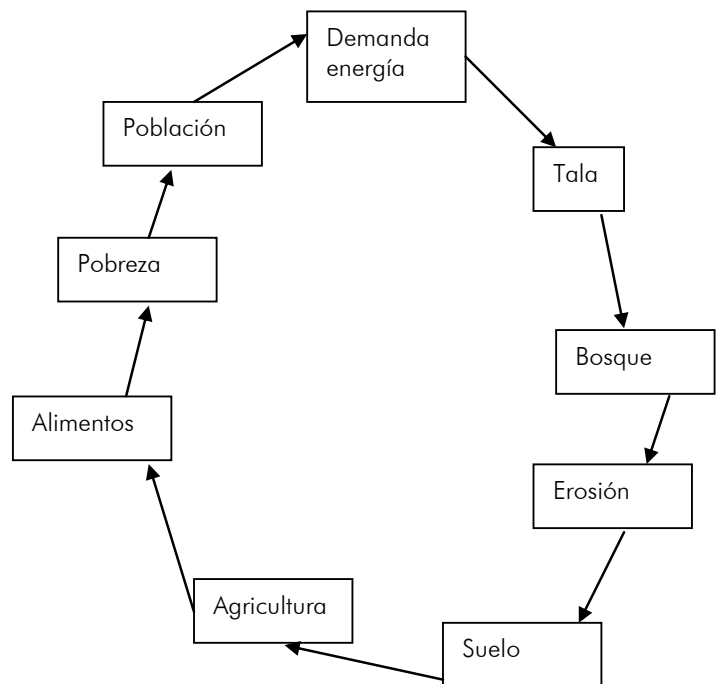
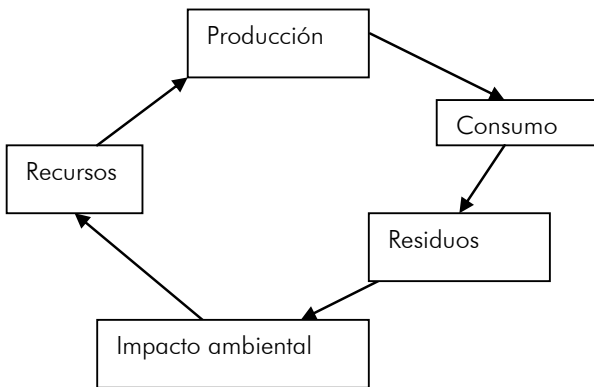
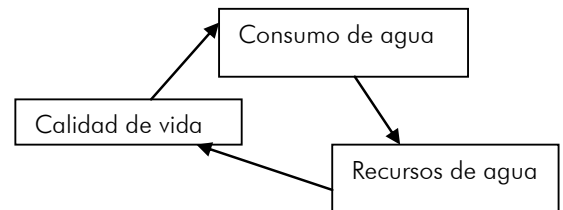
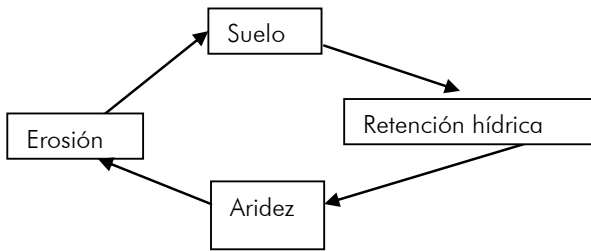
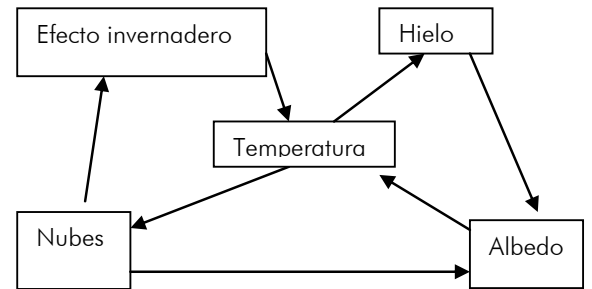
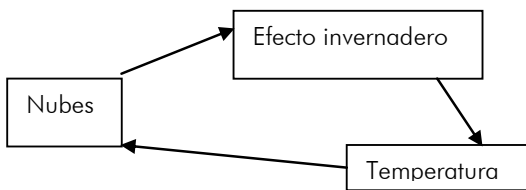
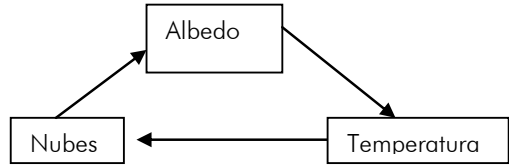
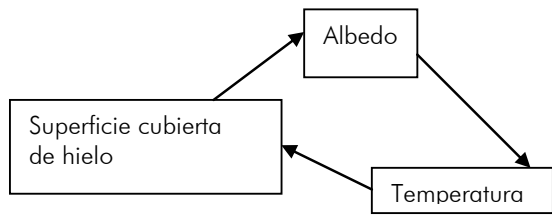
7. ¿Un ser vivo es un sistema? ¿Cómo es su entropía respecto a su entorno y cómo se logra mantener así, teniendo en cuenta el segundo principio de la termodinámica?

8. Indica de qué tipo (abierto, aislado o cerrado) son los siguientes sistemas: el sistema solar, el planeta Tierra, un lago, un bosque, una ciudad y un centro hospitalario.
9. Describir una comunidad vegetal con los nombres científicos y abundancia de todas las especies que la forman, ¿es un enfoque holista o reduccionista? Hacerlo por el peso seco de biomasa por metro cuadrado o los miligramos de clorofila por  $m^2$ . ¿Constituyen enfoques holistas o reduccionistas?
10. Partiendo del modelo de caja negra para un sistema abierto, ¿cómo representarías los procesos de la respiración y la fotosíntesis?
11. ¿Cuántos subsistemas identificas en el esquema? ¿Se trataría de un modelo de caja blanca o de caja negra?



12. Supongamos un ecosistema ideal donde se recicla la materia. ¿Se trataría de un sistema abierto o cerrado? Representa mediante un diagrama como circularía la materia.
13. Indica qué tipo de relaciones se establecerían entre las siguientes variables:
  - Tráfico → Calidad del aire
  - Fotosíntesis → Biomasa forestal
  - Pendiente del terreno → Erosión
  - Horas de estudio → Rendimiento académico → Futuro universitario
  - Alimentación sana → Cáncer de estómago → Gastos en hospitales
  - Sobreexplotación minas de carbón → Recursos de carbón → Tasa de paro
14. Considerando que las relaciones depredador/presa pueden modelarse como sistema cibernético, ¿cómo lo representarías?
15. Se intenta reducir los atascos construyendo más carreteras, lo que supone que más ciudadanos se decidan a conducir y utilizarlas, dando lugar a un bucle en el que la congestión del tráfico permanece constante.
  - a) Modévalo según la teoría de sistemas
  - b) Intenta ofrecer soluciones que no impliquen la construcción de nuevas carreteras

**ACTIVIDADES SOBRE RELACIONES CAUSALES Y RETROALIMENTACIÓN**



**ACTIVIDADES SOBRE EL SISTEMA TIERRA**

- c) Aplica el texto de arriba al caso concreto de la sobreexplotación de los bancos de atunes, explicando los tres tipos de insostenibilidad a los que da lugar y sus consecuencias.

**1.5. El planeta de las margaritas**

El modelo simple del mundo de las margaritas ilustra cómo podría funcionar Gaia. La estrella que calienta e ilumina este mundo comparte con nuestro Sol la propiedad de aumentar su emisión de energía a medida que envejece. Pero está bien provisto de agua y las plantas crecerán en cualquier parte de la superficie continental donde el clima sea adecuado.

El ambiente se circunscribe a una sola variable, temperatura, y el biota a una sola especie, margaritas. En este mundo, la competencia por el territorio de dos especies de margaritas, una oscura y la otra clara, da lugar a una regulación exacta de la temperatura planetaria en el nivel apropiado para el desarrollo de estas plantas. Si es demasiado frío, por debajo de 5 °C, las margaritas no crecerán; su temperatura óptima se sitúa alrededor de 20 °C. Si la temperatura sobrepasa los 40 °C será demasiado caliente para estas flores, y se marchitarán y morirán. La temperatura media del planeta resulta del sencillo balance entre el calor recibido de la estrella y el calor perdido en las frías profundidades del espacio en forma de radiaciones infrarrojas de onda larga. En la Tierra este balance de calor se complica por el efecto de las nubes y los gases como el dióxido de carbono. Asumimos que el mundo de las margaritas tiene una cantidad constante de dióxido de carbono, la suficiente para que las margaritas crezcan, pero no excesiva como para que interfiera en el clima.

La temperatura media del mundo de las margaritas viene determinada por el grado medio de oscurecimiento del color del planeta. Una superficie clara es fría cuando se compara con una superficie oscura.

Imaginemos que la estrella que lo calienta sea menos luminosa, de manera que sólo en la región ecuatorial la temperatura del suelo desnudo, 5 °C, sea suficiente para el crecimiento. Aquí germinarían y florecerían lentamente las semillas de las margaritas. Supongamos que en la primera cosecha se encontrasen especies oscuras y claras, en proporciones semejantes. Las margaritas oscuras se verían favorecidas. Su mayor absorción de la luz solar en los sitios donde creciesen las hubiera calentado por encima de los 5 °C. Las margaritas con colores claros se encontrarían en desventaja. Sus flores blancas hubieran palidecido y muerto porque al reflejar la luz solar se hubieran enfriado por debajo de la temperatura crítica de 5 °C. En la estación

siguiente hubiéramos apreciado un predominio de margaritas oscuras, ya que sus semillas serían más abundantes. Pronto su presencia calentaría no sólo a las mismas plantas sino que, en la medida que crecieran y se dispersaran por la superficie desnuda, calentarían el suelo y el aire, primero localmente y luego regionalmente.

Con este incremento de temperatura, la velocidad de crecimiento, el período de la estación templada y la difusión de las margaritas oscuras, que produciría una realimentación positiva que daría lugar a una colonización de la mayor parte del planeta con margaritas oscuras. Eventualmente, la extensión de las margaritas oscuras se encontraría limitada por un incremento global de temperatura a niveles superiores al óptimo para el crecimiento. Además, cuando la temperatura global fuese alta las margaritas claras crecerían y se extenderían en competencia con las oscuras. El crecimiento y extensión de las margaritas blancas estarían entonces favorecidos por su capacidad natural para mantener el clima frío.

Cuando la estrella que brilla en el mundo de las margaritas envejece, el flujo de calor es tan grande que incluso la cosecha de margaritas más blancas no puede mantener el planeta por debajo del límite superior de 40 °C para el crecimiento. En este momento el poder de las flores ya no es suficiente. El planeta vuelve a ser yermo y tan caliente que ya no hay manera de que puedan florecer nuevas margaritas.

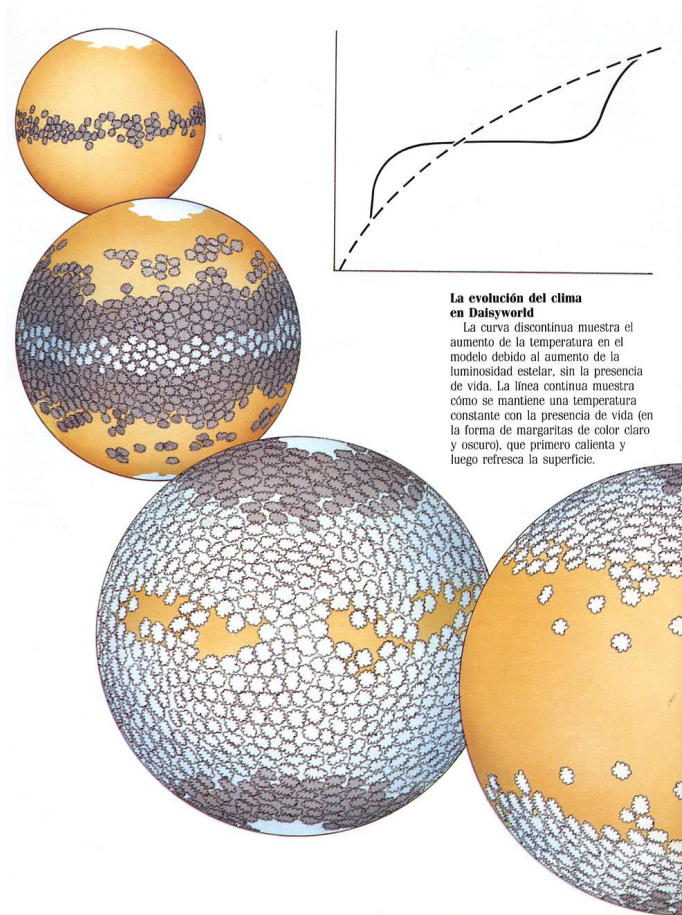
Cuando probé por primera vez el modelo del mundo de las margaritas, quedé sorprendido y encantado de la fuerte regulación de temperatura planetaria que surgía del simple crecimiento competitivo de las plantas de colores claros y oscuros.

*Las edades de Gaia.* J. Lovelock, 1993.

Responde a las siguientes cuestiones:

- Indica y razona si el modelo propuesto por Lovelock es abierto, cerrado o aislado.
- Señala las variables elegidas por él.
- Explica lo que representa para la temperatura planetaria el mantener constante el CO<sub>2</sub> atmosférico y la diferente coloración de las margaritas. ¿Qué tipo de regulación climática ha sido eliminada? ¿Cuál ha sido realzada?
- ¿Qué papel desempeña la biosfera en el modelo?
- ¿Cuál es la causa del fin de la vida en el planeta de las margaritas?
- Comenta las ventajas y los inconvenientes de este modelo, en cuanto a su validez.





16. La Tierra es un sistema en equilibrio. Cuando un componente cambia, el resto también debe cambiar para restablecerlo. Indica mediante un ejemplo alguna de las relaciones entre los distintos componentes del sistema Tierra.
17. ¿El efecto invernadero es una consecuencia de la actual contaminación atmosférica? Razona la respuesta. ¿Por qué es necesario el efecto invernadero natural en la atmósfera? ¿Qué ocurriría si no existiera?
18. ¿Qué importantes cambios ambientales, en el proceso evolutivo de la Tierra, se han debido a la actividad de los seres vivos?

## EL SISTEMA TIERRA: PRESENTACIÓN

El mundo en que vivimos es un sistema complejo que está en continuo movimiento y que recibe su energía fundamentalmente del Sol. Es el *Sistema Tierra*<sup>1</sup>. En él la atmósfera, la litosfera, la vida y los océanos y los hielos polares interactúan de forma permanente y a muy diversas escalas espaciales y temporales.

Una aproximación a estas interacciones podría hacerse mediante un ejemplo sencillo: una encina creciendo en una dehesa. La raíz del árbol penetra en el suelo (litosfera), de donde obtiene, a partir de los minerales liberados por la alteración química de la roca, los nutrientes esenciales para su desarrollo. También del suelo obtiene el agua que necesita, la cual procede de la precipitación (hidrosfera). Además, la encina toma, mediante el proceso de la fotosíntesis, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera para generar carbohidratos e incorporarlos a su tejido celular; al mismo tiempo que libera oxígeno. La encina, al morir, sufre una degradación bacteriana, para pasar finalmente a formar parte de la litosfera mediante la adición de nuevos nutrientes al suelo o mediante su fosilización en el seno de una roca sedimentaria, pudiendo llegar a formar carbón. Resulta obvio en este ejemplo simple que si se altera alguna de las condiciones, puede darse un efecto dominó o reacción en cadena, que terminará por afectar a los distintos subsistemas implicados. Si en lugar de imaginar un solo árbol, intentamos imaginar el conjunto del sistema terrestre y sus múl-

tiples interacciones, no será difícil comprender por qué con frecuencia los científicos y los ecologistas hablan del "delicado equilibrio" en que se encuentra.

Esas múltiples, permanentes y complejas interacciones que tienen lugar en el sistema terrestre, de forma conjunta con la energía que el sistema recibe del Sol, constituyen el factor fundamental que controla el clima<sup>2</sup> del planeta. Si pensamos en el elevadísimo número de interacciones que intervienen en ese clima global, resulta sencillo concebirlo como algo sumamente complejo y dinámico y, por tanto, cambiante en el tiempo. En este libro analizaremos esos cambios, que han operado a lo largo de la historia del planeta y que seguirán actuando en el futuro. Esos cambios que afectan al clima son los genéricamente denominados *cambios globales*.

Sin embargo, oímos o leemos casi a diario la expresión *cambio global* en los medios de comunicación, y es normal que entonces nos preparemos para recibir alguna noticia —generalmente desalentadora— que hace referencia al cambio climático que muy posiblemente esté experimentando el sistema terrestre en la actualidad, en el cual la actividad humana parece estar interviniendo de forma decisiva al modificar, con sus emisiones de dióxido de carbono y otros gases, el efecto inverso natural y con ello el clima que disfrutaremos / sufriremos en las próximas décadas y siglos. Este cambio global "antropogénico", del cual nos ocuparemos también en este

libro, se superpone por tanto a la variabilidad natural del sistema terrestre, esto es, a los cambios que, de forma ajena a la actividad humana, han operado durante la historia de la Tierra, y lo han hecho en escalas de tiempo muy variables, que oscilan entre cientos de millones y unos pocos años.

<sup>1</sup> Utilizaré en este libro el término *Sistema Tierra* o *sistema terrestre* para referirme al conjunto formado por la atmósfera, la litosfera, la hidrosfera (incluyendo la criosfera) y la biosfera, aunque también se usará, con idéntico significado, el término sistema climático.

## EL SISTEMA TIERRA: ASÍ FUNCIONA

Un sistema es dinámico porque existe una energía que le permite estar en continuo movimiento. En el Sistema Tierra tenemos tres fuentes energéticas fundamentales: la energía gravitacional, la energía del interior de la Tierra, y la energía que recibimos del Sol.

Todo en nuestro planeta está sometido a la acción de las fuerzas gravitatorias, las cuales mantienen a la Tierra en su órbita y determinan los ciclos orbitales, controlan las mareas, permiten los procesos de naturaleza convectiva en la atmósfera, en los océanos y en el interior de la Tierra. Asimismo controlan fenómenos fundamentales de la superficie terrestre como la escorrentía superficial y la subterránea, el movimiento de los glaciares, las avalanchas de nieve, los desprendimientos de roca y los procesos de erosión y sedimentación. La segunda fuente de energía, el calor terrestre, está producido esencialmente por la desintegración radioactiva de elementos como el torio y el uranio en el interior del planeta, es la fuente energética fundamental en los procesos internos de la litosfera, aquellos que determinan el movimiento de las placas y los continentes, la formación de las cadenas de montañas y de los océanos y la existencia de volcanes. Y finalmente tenemos el Sol. Hoy sabemos que se trata de una estrella corriente, bastante pequeña, y en la mitad de su vida, ubicada en un lugar quizás poco privilegiado de una galaxia de tipo medio, la Vía Láctea. Sin embargo, la energía que emite (la *radiación solar*) y que nosotros recibimos es el motor esencial de los procesos que operan en la atmósfera y la hidrosfera y también lo es de muchos de los procesos litosféricos que denominamos externos por producirse en superficie. Y, finalmente, es la energía que hace posible el desarrollo de la vida.

La radiación solar es la fuente energética fundamental del sistema climático. Que recibimos cantidades ingentes de calor, luz y rayos ultravioleta procedentes del Sol es un hecho que no sorprende a nadie. Sin embargo, para entender el sistema es fundamental conocer la respuesta a la siguiente pregunta: ¿emite también la Tierra energía? Por supuesto que sí, y emite una cantidad muy grande: la misma que recibe del Sol. Si emitiese menos, rápidamente se calentaría, se haría estéril y su superficie rocosa terminaría por fundirse. Sin embargo, el sistema terrestre mantiene (y ha mantenido desde hace al menos 600 millones de años) su temperatura media dentro de un rango de variación muy estrecho, con cambios máximos de en torno a una decena de grados arriba o abajo. La Tierra, sin embargo, al estar mucho más fría que el Sol, no emite luz ni rayos ultravioleta, sino únicamente calor.

Activados por la energía solar, la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera y la biosfera interaccionan entre sí de múltiples formas, condicionando los patrones de cambio del sistema climático.

### CUESTIONES

1. ¿Qué subsistemas del Sistema Tierra distingue el autor?. ¿Qué parte de la Tierra engloba cada uno?. ¿Qué es la criosfera?
2. ¿A qué nos referimos cuando decimos que la Tierra se encuentra en “equilibrio dinámico”?. ¿Porqué es tan delicado dicho equilibrio?
3. ¿Qué significa CAMBIO CLIMÁTICO?. Busca alguna causa responsable de dicho cambio.
4. ¿Cuáles son las fuentes de energía que operan sobre el Sistema Tierra?. ¿Cuál de ellas es la responsable del mantenimiento de la vida?. ¿Y del movimiento de los continentes?. Indica tres ejemplos de cómo actúa la fuerza de la gravedad sobre la atmósfera, hidrosfera y litosfera.
5. Da razones por las que el Sistema Tierra se comporta como un sistema abierto respecto al intercambio de energía y cerrado respecto al intercambio de materia.