

**FUNDACION PARA EL FOMENTO EN ASTURIAS
DE LA INVESTIGACION CIENTIFICA
APLICADA Y LA TECNOLOGICA
F.I.C.Y.T.**

**CONTAMINACION
E
INGENIERIA AMBIENTAL**

*Dirección científica y edición
(Universidad de Oviedo)*

**Julio L. Bueno
Herminio Sastre
Antonio G. Lavín**

*Dirección Técnica
Lucas Leiva (Consultor)*

Oviedo, 1997

1. INTRODUCCION

Los elementos químicos constituyentes de la Tierra se encuentran distribuidos en ésta de forma heterogénea. Mientras unos son abundantes en las capas superiores de la corteza, otros lo son en la atmósfera o en la hidrosfera. La especie química en la que se encuentra cada elemento en cada uno de los ambientes puede ser, y generalmente lo es, diferente

Los organismos vivos tienen una composición química relativamente semejante pero a la vez diferente de la del entorno que los rodea, tanto por composición elemental como por las especies químicas en las que se encuentran cada uno de sus elementos constituyentes. Los organismos intercambian de forma constante elementos y materiales (compuestos) con su entorno pudiendo modificar el ambiente en el que se encuentran; la Biosfera puede provocar modificaciones a escala terrestre.

El estudio de los intercambios de elementos entre diferentes compartimentos de la Tierra y el papel de los procesos físicos, químicos y biológicos se realiza en el marco de la Biogeoquímica. Uno de los aspectos que actualmente preocupa más se refiere a la importancia de las modificaciones de los flujos entre compartimentos que se están produciendo a diferentes escalas en la Tierra, y el alcance que estas modificaciones pueden tener para la vida sobre la Tierra y sobre la propia actividad del hombre. Todos estos aspectos se relacionan de forma directa con otra disciplina científica, la Ecología, puesto que ésta pretende explicar la distribución y abundancia de los organismos a diferentes escalas, y parece evidente que la distribución de diferentes especies se relaciona en parte con las características del medio (incluida su composición). Además, los organismos pueden ser responsables de algunos de los mecanismos de síntesis y transporte de materiales.

Los nexos entre Biogeoquímica y Ecología tienen dos vertientes:

– El efecto de los organismos sobre los flujos de los elementos..

- El efecto de modificaciones del medio sobre la abundancia de las especies y sobre las comunidades

Para entender de una forma simple estas interacciones se puede modelar el funcionamiento de los intercambios de elementos en la Tierra sin la presencia de organismos. Pensemos en el intercambio entre tres compartimentos: litosfera, hidrosfera y atmósfera. Los intercambios se producirían por procesos físicos y químicos (difusión, reacciones químicas, gravedad, disolución, etc.). Los intercambios pueden ser entendidos como tasas de flujo (α), y el conjunto de éstas podría expresarse como una matriz de transferencia entre los tres compartimentos

	Litosfera	Atmósfera	Hidrosfera
Litosfera	α_{11}	α_{1a}	α_{1h}
Atmósfera	α_{a1}	α_{aa}	α_{ah}
Hidrosfera	α_{h1}	α_{ha}	α_{hh}

En ausencia de modificaciones en las tasas de intercambio, se puede suponer la existencia de un equilibrio secular. Sólo alteraciones en las condiciones de la Tierra (p.e. velocidad de rotación, cambio en la distribución de continentes y océanos, choque de grandes meteoritos, etc.) modificaría la composición elemental de cada compartimento.

La aparición de un nuevo compartimento de diferente composición y con capacidad de crecimiento y autoperpetuación provocaría la alteración de los equilibrios previos, y haría necesario introducir en el modelo un nuevo compartimento; este compartimento sería la Biosfera. La Biosfera ha demostrado su capacidad para alterar la composición de la atmósfera, convirtiéndola en oxidante y por tanto alterando la reactividad de muchos elementos, p.e. el hierro

Todos los procesos implicados en la actualidad en las transferencias entre distintos compartimentos deben ser conocidos para responder a alguna de las cuestiones que son importantes en la actualidad: ¿Existe un proceso de desequilibrio en los flujos biogeoquímicos que puede alterar la vida sobre la Tierra? En caso de existir, ¿qué influencia puede tener sobre la distribución, abundancia y supervivencia de los organismos? ¿Existen mecanismos biológicos cibernéticos que pueden controlar los cambios observados en la actualidad?

Dentro de la Biosfera se ha desarrollado una especie, el hombre, que además de sus propiedades como tal, tiene la capacidad de utilizar energía exosomática. Esto le permite realizar transporte y movilización a gran escala de los elementos químicos, modificando, asimismo, su reactividad. Siendo así ¿qué papel representa la actividad humana dentro de los flujos globales y locales?

Para analizar aquellos aspectos más destacados en el estudio de los flujos biogeoquímicos analizaremos de forma separada el papel de la Biosfera como compartimento independiente dentro del marco de los conocimientos ecológicos, y algunos flujos de

elementos o compuestos importantes que resulten indicativos de los tipos de procesos implicados en los mismos. También se procurará dar algunas pinceladas sobre el papel del hombre en cada uno de ellos, principalmente como movilizador de elementos a partir de compartimentos inactivos para los organismos.

2. PRINCIPIOS DE ECOLOGIA

2.1. Procesos naturales

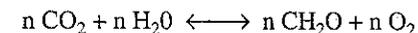
Las partículas materiales que llamamos organismos tienen de singular su composición química, que no difiere de forma sustancial de una composición media (expresada en porcentaje del peso) de:

H: 49,8 %	C: 24,9 %	O: 24,9 %
N: 0,27 %	Ca: 0,073 %	K: 0,046 %
Si: 0,033 %	Mg: 0,031 %	P: 0,030 %
S: 0,017 %	Al: 0,016 %	

de su capacidad para autoperpetuarse y de introducir modificaciones en las instrucciones de su constitución (información genética). Otra de las características de los organismos es su diversificación en el tamaño, forma, composición y comportamiento, lo que permite diferenciar unidades de autoperpetuación, las especies. Cada una de estas unidades representa una posibilidad de intercambio de materia y energía con su entorno, ocupando cada una de ellas una posición diferente sobre la superficie de la Tierra. Estas diferencias están relacionadas con las posibilidades de intercambio de cada especie con su entorno, incluidas en éstas sus interacciones con otros organismos.

2.1.1. Producción primaria y secundaria

Todos los organismos necesitan energía para desarrollar sus actividades, y deben intercambiar elementos y moléculas previamente sintetizadas para poder construir su estructura y desarrollar su actividad vital. No todos los organismos tienen la misma forma de acceder a las fuentes energéticas y materiales; unos tienen disociadas las fuentes de energía y materia, y otros adquieren a la vez la energía y la materia. Son los productores primarios y secundarios. Los productores primarios utilizan como energía la radiación solar (energía electromagnética) en una banda que va de 380 a 700 nm, la luz o parte visible del espectro. Mediante ésta, pueden provocar la fotólisis del agua y la adquisición de poder reductor (paso de NADP a NADPH). Dicho poder es usado en la síntesis de moléculas orgánicas a partir de sales inorgánicas, a saber: dióxido de carbono, nitrato-nitrito-amonio, fosfato, sulfato, etc., en las que se encuentran los elementos necesarios para la constitución de moléculas orgánicas, Figura 1. El proceso de síntesis se conoce como fotosíntesis, de la que su ecuación básica es



El proceso es reversible, y su inverso es la respiración.

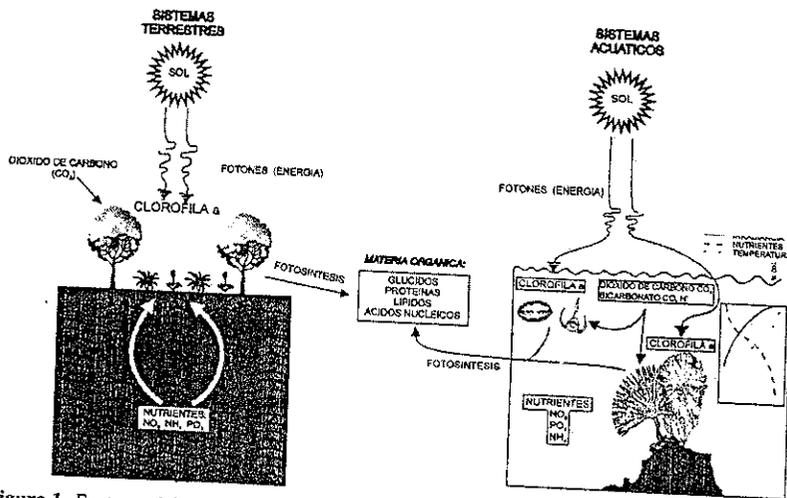


Figura 1. Factores del medio que influyen en la fotosíntesis y comparación entre sistemas terrestres y acuáticos. La materia orgánica es el resultado de la propia fotosíntesis y del metabolismo secundario de los productores primarios. En los medios acuáticos la irradiancia, la temperatura y los nutrientes se distribuyen heterogéneamente con la profundidad.

Una vez fijada la energía en forma de enlace, puede ser utilizada mediante cadenas de reacciones químicas, catalizadas por enzimas, y se pueden producir nuevas moléculas o utilizar éstas como fuente energética para el desarrollo de la actividad orgánica de los productores primarios. Una forma cuantitativamente poco importante a nivel global, pero que puede tener importancia a nivel local es la quimiosíntesis, que utiliza como fuente energética materiales inorgánicos reducidos, p.e. sulfuros.

El proceso de síntesis de materiales orgánicos implica, por tanto, la existencia de una fuente energética continua y difusa, la luz, y la presencia de determinadas sustancias inorgánicas en el medio, las sales nutrientes. La capacidad productiva de un área depende de la existencia de estos componentes en concentración suficiente. El proceso de síntesis implica, además, la retención de C,N,P,S,H,O,Fe y la práctica totalidad de elementos químicos en forma de partículas orgánicas (vivas o muertas) de duración variable, entre pocos segundos y milenios.

La distribución de la producción primaria neta (producción primaria bruta menos la respiración de los propios vegetales) en la Tierra se relaciona con la disponibilidad de luz y nutrientes asimilables. Por tanto, diferentes tipos de sistemas tendrán diferente capacidad productiva y sostendrán distintas biomásas.

Cuando los organismos no pueden sintetizar sus propios materiales a partir de sales inorgánicas y necesitan adquirirlos de otros organismos mediante la alimentación, serían productores secundarios. Un caso especial lo constituyen las bacterias, que pueden utilizar sales inorgánicas si existe una fuente de carbono orgánico.

Los materiales utilizables por los consumidores, la producción primaria neta, son el resultado de la producción primaria menos la respiración de los propios vegetales.

La transferencia de materiales se realiza por vía trófica, mediante cadenas o redes alimentarias, Figura 2. La eficiencia de transferencia parece ser una característica de cada ecosistema, y depende de diversos factores entre los que se encuentran: cantidad y calidad de la materia sintetizada, tamaño de las partículas, características morfológicas y fisiológicas de los consumidores, frecuencia y amplitud de los procesos productivos, etc., por lo que no existe una norma general. Sólo se asume que deben existir procesos de optimación en el uso de recursos que dependen de procesos evolutivos (las especies que constituyen el propio sistema) y sucesional (el tiempo que un ecosistema ha tenido para desarrollar y organizar las interacciones dentro del sistema)

MODELOS DE REDES ALIMENTARIAS

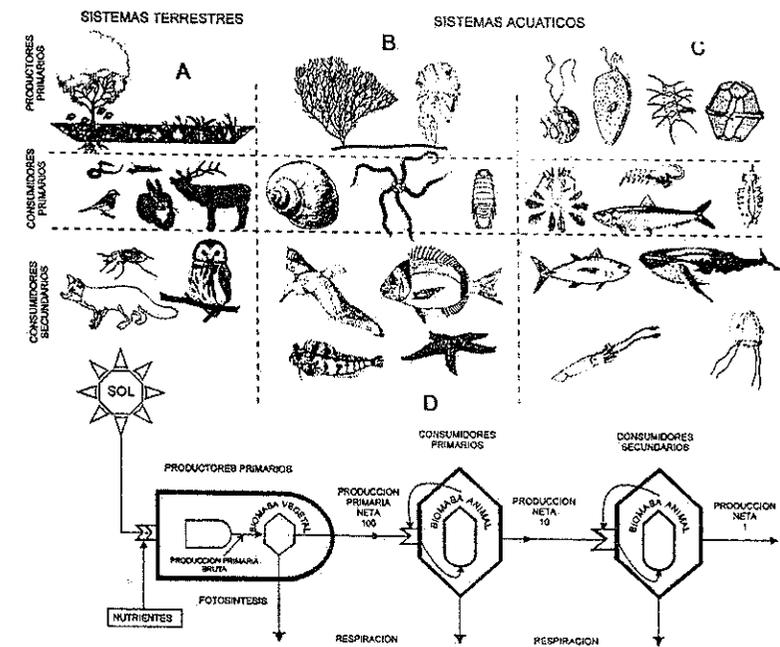


Figura 2. Modelos de redes alimentarias en diferentes tipos de ecosistemas

A) Sistemas forestales.

B) Sistemas marinos costeros.

C) Sistemas planctónicos oceánicos.

Se indican algunos tipos de organismos en cada una de ellas. La transferencia de energía y de materiales es, sin embargo, similar (D).

2.1.2. Diversificación, coevolución y competencial

Desde la aparición de la vida sobre la tierra se ha producido una diversificación de los organismos y de las actividades que éstos desarrollan. La diversificación se ha desa-

rollado por Evolución de los organismos. Se asume que los organismos cuyas características permiten un mejor uso de los recursos incrementan relativamente el número de sus descendientes, o lo que es lo mismo, la abundancia de dicho genotipo a las siguientes generaciones. Esta presión evolutiva se ha traducido en la presencia de organismos con propiedades específicas para cada uno de los ambientes. La diversificación de actividades está ligada a la heterogeneidad ambiental existente en la Tierra, y a las diferencias de los propios organismos como recurso.

En el término ambiente hay que considerar dos tipos de factores: condiciones y recursos. Una condición sería un factor ambiental abiótico no consumido por los organismos (temperatura, pH, humedad, velocidad de corriente, etc.). Para una determinada especie se podría definir un nivel óptimo de la condición, en el cual desarrolla mejor sus actividades, manifestando un descenso en ésta para valores inferiores y superiores a ese óptimo, Figura 3

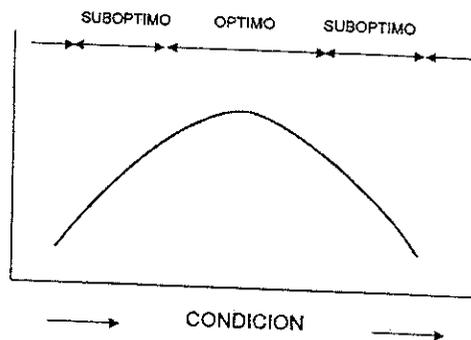


Figura 3. Representación idealizada de la respuesta de una población a diferentes valores de una condición. En el subóptimo los individuos pueden crecer y en el óptimo, además, pueden reproducirse

Los recursos implicarían a todos aquellos factores que pueden ser consumidos, y que debido a la actividad de los organismos pueden ver disminuida su abundancia, Figura 4. Los recursos son de varias categorías, incluyendo una muy importante, la de las materias que forman parte de su cuerpo, pero también aquellos lugares útiles para desarrollar alguna actividad (cavidades donde se puedan proteger, p.e.) u otros organismos de la misma especie con el que pueda realizar una actividad vital (p.e., hembras en estado reproductivo)

La evolución ha conducido a una diversificación de genotipos que permiten el uso "óptimo" de determinadas condiciones (creando agregados congénicos en gradientes ambientales, p.e.), y además ha ejercido una presión evolutiva desde el punto de vista de la accesibilidad a los recursos. Esta presión evolutiva se ejerce mediante diversos procesos, algunos que implican pugna (relaciones depredador-presa o huésped-parásito, competencia) y/o cooperación para su adquisición (coevolución, simbiosis).

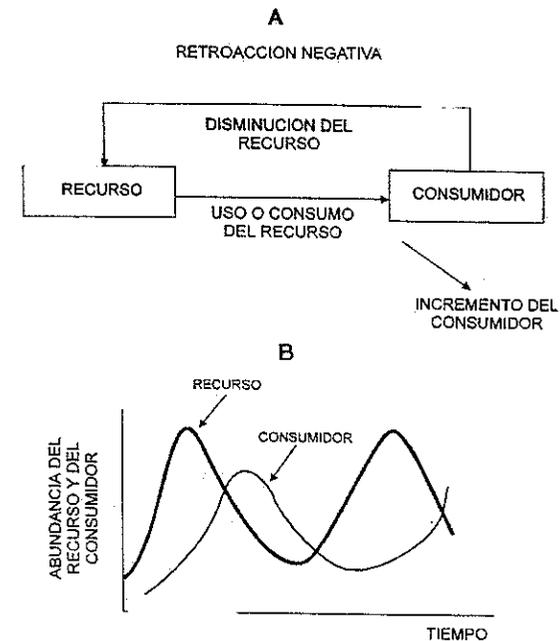


Figura 4. Representación idealizada de las relaciones entre consumidor y recurso. A) Retroacción negativa entre consumidor y recurso. B) Variación temporal en la abundancia de consumidores y recursos derivada de la relación anterior (este tipo de relaciones se pueden predecir a partir de modelos, p.e. depredador-presa).

Las fuerzas que han movido la transformación de las especies deben ser de dos tipos:

- La tendencia a la eliminación de especies y/o genotipos menos eficientes, procesos en los que la competencia (uso de recursos comunes) y las relaciones entre presas u hospedadores y depredadores o huéspedes (desarrollo de mecanismos de defensa y captura perfeccionados) son los más señalados en la literatura.
- La tendencia a la permanencia de las especies desarrollando mecanismos mutualistas (implican beneficios para una o las dos especies interactuantes) o mecanismos que reducen la eficacia de las relaciones señaladas en el primer caso (reducción de la virulencia de los parásitos, adquisición de coloraciones o actitudes crípticas en presas, divergencia de caracteres en competidores, etc.) que permiten el mantenimiento de las relaciones y por tanto el mantenimiento y diversificación de las especies en las comunidades, como en el modelo presentado en la Figura 5 (Connell y Orians, en Pianka, 1982). Por lo dicho anteriormente, se puede deducir que un mismo tipo de relación puede generar respuestas aparentemente con-

trarias. Hay que tener en cuenta que las escalas de tiempo y espacio en las que estas relaciones se han generado, la o las comunidades en las que las relaciones han tenido lugar y, el propio origen de las especies que interactúan, provoca que el futuro de una determinada relación tenga una indeterminación elevada.

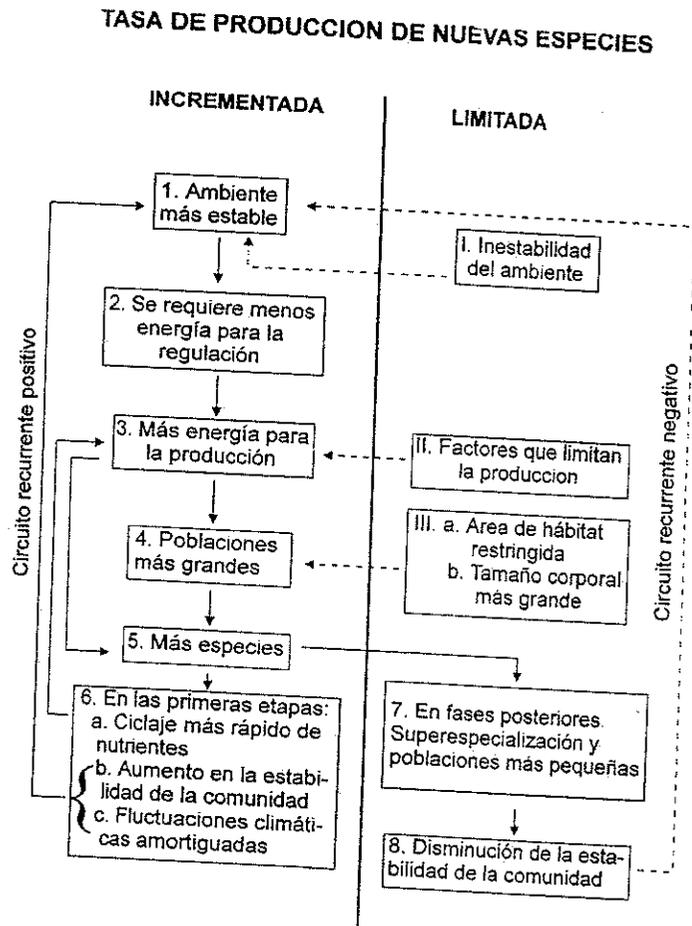


Figura 5. Mecanismos de generación de especies propuesto por Connell y Orians (1964), en los que aparecen dos circuitos recurrentes, uno positivo de generación de especies, y otro negativo de desaparición.

Dentro de un ecosistema existen procesos de ajuste entre las especies que los constituyen que se relacionan con las interacciones biológicas ligadas al uso de recursos concretos (moduladas por la respuesta a las condiciones) que forman parte de la fun-

ción del propio sistema. Se supone que la permanencia de un determinado ecosistema parte de la existencia de este tipo de relaciones, que serán tanto más intensas y elaboradas cuanto mayor haya sido el tiempo en el que se han mantenido las condiciones del medio. Asimismo, las posibilidades de diversificación disminuirán en función de la dureza de las condiciones del medio y del estrés que provoquen en los organismos.

En resumen, los ecosistemas son el resultado de procesos históricos de creación y eliminación de especies, relacionados con la respuesta de cada una a las condiciones del medio y a las interacciones de tipo biológico que se den en cada comunidad. Además, existen procesos aleatorios relacionables con la supervivencia de los organismos (perturbaciones), Figura 6. Están sujetos a cambios y procesos de ajuste constante, y poseen una dinámica característica.

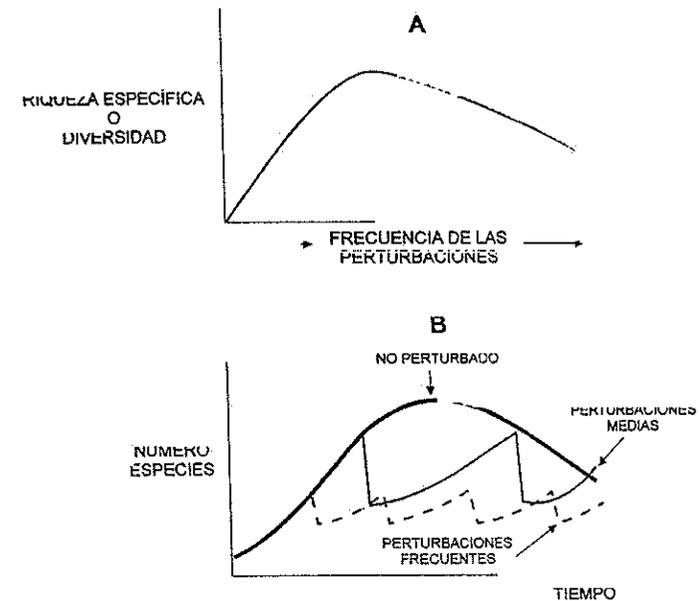


Figura 6. A) Modelo de las perturbaciones medias propuesto para explicar el número de especies de un ecosistema. Se relacionaría ésta con la frecuencia e intensidad de las perturbaciones que sufre cada ecosistema particular. B) Modelo idealizado de la variación en el tiempo del número de especies de ecosistemas sujetos a diferentes intensidades de perturbación.

2.2. La biosfera y el hombre

El hombre desde un punto de vista biológico es una especie más, aparecida en el transcurso de la evolución. Su composición no difiere grandemente de la de otros mamíferos, lo mismo que su actividad biológica incluidos los gastos de mantenimiento por unidad de masa. En su origen el papel del hombre en los ecosistemas parece ser el de una especie gregaria y omnívora, Figura 7.

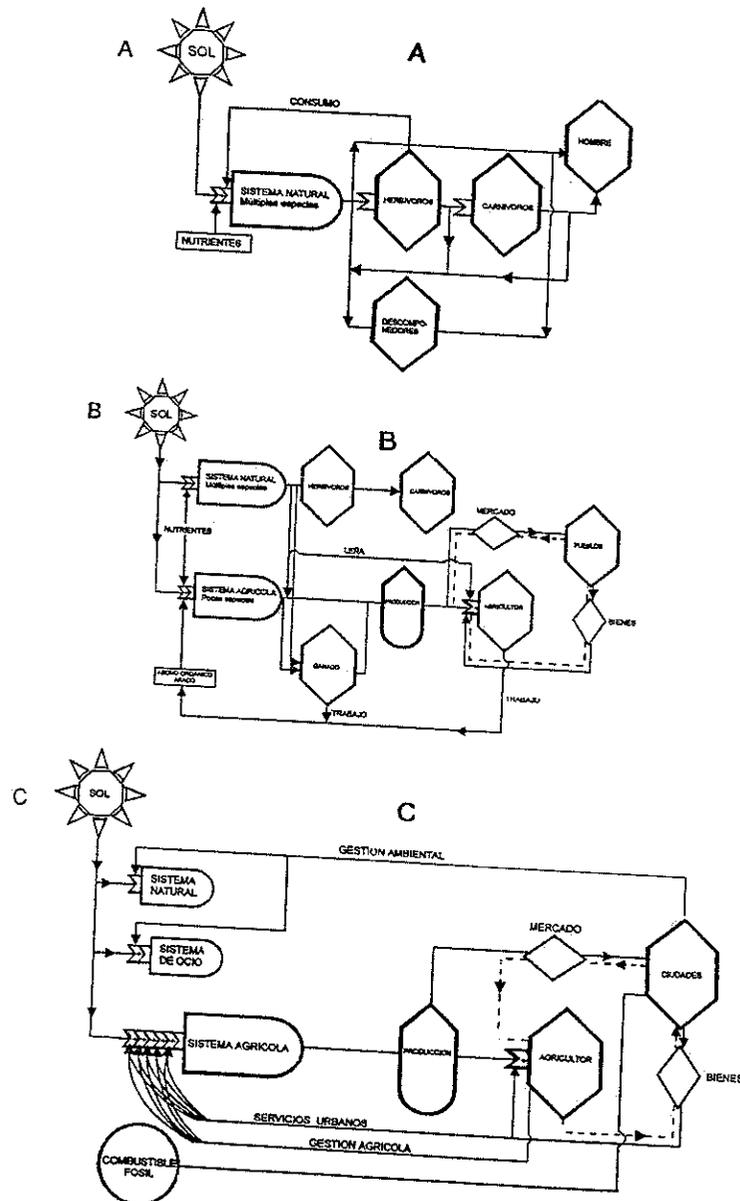


Figura 7. Diagramas energéticos de tres tipos de ecosistemas con diferente grado de influencia humana.
 A) Sistema natural explotado por humanos recolectores cazadores.
 B) Sistema agrícola-ganadero tradicional.
 C) Sistema de producción agrícola-ganadero industrializado.

La capacidad del hombre para desarrollar herramientas elaboradas, aprovechar otras fuentes energéticas no metabólicas y realizar actividades con objetivos en el futuro, le permitió actuar de una forma diferencial respecto a los ecosistemas. El desarrollo de actividades de cooperación con otras especies con vistas a la obtención de recursos o la realización de trabajo (agricultura, ganadería) alteró en primer lugar los procesos del ecosistema sosten, que pasaron de tener un control natural a un control ejercido por el hombre, e implicaron ventajas para algunas especies (p.e., trigo, maíz, tomate, vacas, ratas, moscas...), Figura 7.

El desarrollo de tecnologías que permitieron la realización de trabajo a partir de fuentes no metabólicas (p.e., viento) o la optimización de éstas (p.e. el uso de ruedas) permitió al hombre influir de una manera más importante sobre la organización y el funcionamiento de los ecosistemas, y permitieron el transporte de materiales a una escala significativa para los flujos de los sistemas humanizados, con lo que esto implica en procesos de acumulación de determinados elementos, Figura 7.

El descubrimiento reciente de fuentes energéticas concentradas (combustibles fósiles, p.e.) ha permitido que estos procesos alcancen una dimensión global, permitiendo la realización de un volumen de trabajo inmenso con muy poca actividad metabólica por parte del hombre o de sus animales domésticos. Este incremento reciente de la capacidad de desarrollar trabajo sin necesidad de recurrir a las fuentes energéticas proporcionadas por el propio ecosistema (alimento para el hombre o sus animales, leña para cocinar o calentar los hogares, etc.) ha permitido un incremento espectacular de la población humana (hoy la biomasa humana es inmensa) y una modificación de los procesos biogeoquímicos a escala regional, permitiendo el transporte y acumulación de gran cantidad de materiales en zonas específicas. El volumen de esta transferencia generada por acciones antrópicas alcanza valores, en el caso de algunos elementos, en el rango de los que se producen de forma natural en toda la Tierra (impactos globales).

Resultado de todo ello es una modificación de los sistemas naturales bien por acción directa del hombre (sistemas agrícolas, captura de especies para alimentación u otros fines), bien por reducción de la superficie ocupada por ecosistemas naturales con anterioridad (deforestación, fragmentación del medio, obras públicas que generan barreras a los organismos), bien por la modificación en las condiciones o recursos provocados de forma consciente o inconsciente por el hombre (contaminación, desertificación, cambio en las condiciones climáticas, cambios globales).

2.3. Biocenosis e indicadores biológicos

Por lo mencionado con anterioridad se puede admitir que la Biosfera está compuesta por unidades (clasificables por diversos métodos) caracterizadas por su composición y por la abundancia relativa de sus especies constituyentes. Estas unidades pueden ir desde Biomas o grandes unidades paisajísticas, caracterizadas por los tipos biológicos de sus organismos constituyentes, hasta Comunidades caracterizadas por una composición específica concreta. Estas unidades también pueden ser caracterizadas a partir de los flujos de materia y energía de cada una de ellas.

Cada una de estas unidades podría determinarse por la presencia de alguna especie con gran abundancia o por la presencia de alguna especie característica (respecto a uno o varios factores del medio). Estos tipos de especies serían indicadoras de un determinado ambiente y permitiría definir las comunidades típicas de una región.

Este concepto puede ser extendido a las comunidades que sufren alteraciones de origen antrópico. Hay que pensar que los organismos registran los cambios del medio de forma continua, y que cada especie tiene un rango de tolerancia específico. La tolerancia se puede medir desde modificaciones en algún parámetro fisiológico (mecanismos de detoxificación, cambios en la actividad metabólica, cambios en el comportamiento, etc.) hasta modificaciones en la tasa de supervivencia. El único problema que representan los organismos indicadores es la inespecificidad de respuesta ante diferentes influencias. En general pueden ser usados como indicadores de modificaciones no explicitadas y/o difusas, siendo un mecanismo rápido y barato de detección de las modificaciones. En todo caso, bien usando algunas especies con gran especificidad de respuesta, o por el conjunto de los organismos presentes, puede hacerse una diagnosis aceptable para múltiples usos del estado de un río o de otros ambientes.

3. CICLOS BIOGEOQUÍMICOS: SUS TIPOS

Como se mencionó con anterioridad, los flujos de materiales que circulan por la Biosfera como materiales orgánicos tienen una fase inorgánica, localizada en distintos compartimentos, y sujeta por tanto a procesos físicos y químicos. Los elementos que se consideran dentro de flujos biogeoquímicos se refieren de forma principal a aquellos que son mayoritarios en la composición de los organismos.

Cada átomo de un elemento puede circular entre distintos compartimentos mediante procesos de meteorización, síntesis, transporte y sedimentación, fenómenos sobre los que actúan las capas fluidas de la Tierra. Se supone que los flujos entre compartimentos son estables, pero pueden modificarse si se altera alguno o algunos de los procesos que se relacionan con dichos flujos (erupciones volcánicas, choques de grandes meteoritos con la Tierra, p.e.); estas alteraciones modificarían los equilibrios seculares (medibles en tiempo geológico) de los distintos elementos en cada compartimento. Por término medio un átomo tiene un tiempo de residencia característico en cada compartimento, tiempo que depende de la abundancia del elemento en el compartimento (modelable como un vector que exprese la concentración del elemento en cada uno de los compartimentos diferenciables) y del flujo entre éstos (modelado de forma intuitiva en el cap. 1). El inverso del tiempo de residencia sería la tasa de renovación del elemento en cada compartimento, Figura 8.

Estos conceptos son importantes porque permiten analizar desde un punto de vista global si los ecosistemas están en equilibrio o no, las causas (antropógenas o no) del desequilibrio en su caso, y el papel que puede representar el hombre en una escala terrestre global, regional o local.

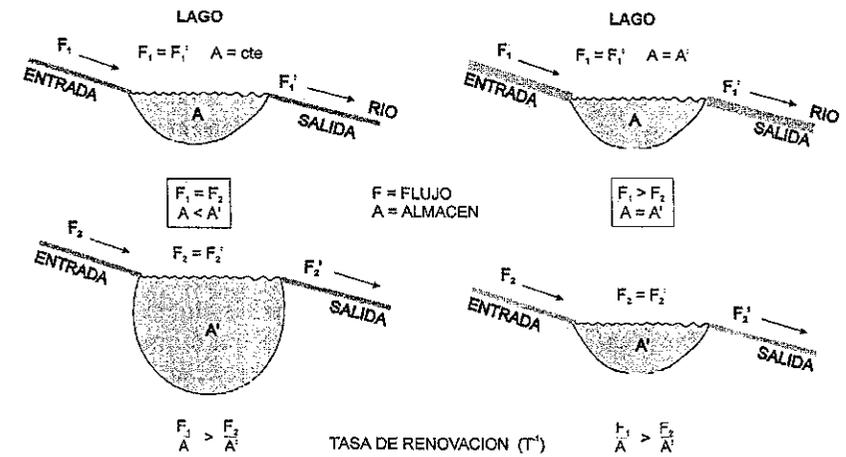


Figura 8. Diagrama idealizado para indicar aspectos importantes que hay que tener en cuenta para analizar cuantitativamente el ciclo de cualquier elemento, tanto a nivel local como global.

A) Representa dos sistemas con flujo igual y reservorio diferente

B) Representa dos sistemas con distinto flujo e igual reservorio.

Ambos presentan tasa de renovación diferentes.

Los compartimentos principales que pueden reconocerse al estudiar los ciclos biogeoquímicos son: la atmósfera, los océanos, las aguas continentales superficiales (en forma líquida o como hielo), las aguas continentales subterráneas, el suelo, los sedimentos y las rocas. Otro compartimento de gran interés lo constituyen los materiales orgánicos; en este caso hay que diferenciar los materiales que forman parte de los organismos vivos y la materia orgánica muerta. Además, debe considerarse la ubicación de los organismos y de cada uno de los elementos en los compartimentos reseñados.

Dos son los tipos de ciclos biogeoquímicos dependiendo del compartimento (reservorio) en el que tenga el mayor tiempo de residencia (o esté en mayor cantidad):

– Ciclos sedimentarios.

En los que un elemento queda retenido en los sedimentos por millones de años, y sólo son utilizables por los organismos después de un ciclo geológico.

– Ciclos atmosféricos.

En los que los elementos residen en la atmósfera y la hidrosfera, pero en forma inactiva para los organismos (p.e. el nitrógeno en forma de N_2).

Pueden existir ciclos mixtos, cuando el elemento se encuentra en abundancia semejante en la atmósfera y en los sedimentos

Dos ideas deben quedar claras:

- 1) Los ciclos de los elementos, a nivel global, se comportan de manera diferente, aunque de forma local o en medios concretos puedan discurrir en paralelo.
- 2) La idea sobre el equilibrio de los ciclos no es válida de forma general, y debe ser usada con precauciones; en todo caso siempre se debe expresar la validez temporal del equilibrio. Ello no quiere decir que las hipótesis sobre mecanismos cibernéticos de control de los ciclos, en los que los organismos juegan un papel fundamental como estabilizadores de los ciclos biogeoquímicos, como la hipótesis GAIA, sean incorrectos

Respecto a estas últimas asunciones, conviene recordar las diferencias entre sistemas no perturbados y perturbados. En los primeros, en los que el control biológico se maximiza, existe un reciclado de la mayoría de los elementos, por lo que las distancias entre el lugar en que un átomo es liberado y capturado de nuevo por los organismos se minimiza; en este caso los ciclos a nivel local se acompañan. Cuando el sistema se perturba la distancia de liberación y captura se amplía, y los ciclos a nivel local se desacompanan, en general perdiéndose el elemento para el sistema, Figura 9

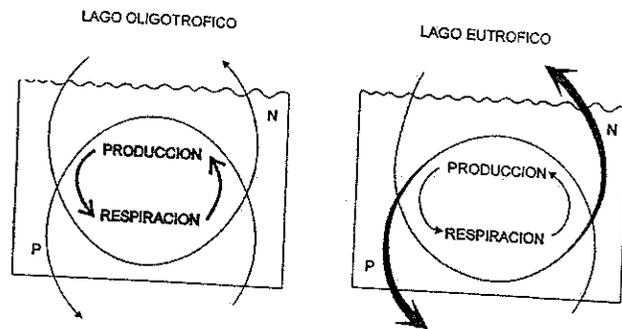


Figura 9. Diagramas que representan el flujo de elementos en dos sistemas límnicos diferentes, oligotrófico y eutrófico. En el caso de lagos oligotróficos los ciclos de diferentes elementos se encuentran acoplados, mientras que en lagos eutróficos los ciclos de los distintos elementos se encuentran desacoplados.

4. CICLO DEL AGUA

4.1. El ciclo natural

El agua de la Tierra se evalúa en 1.400 millones de kilómetros cúbicos, que se reparten entre los océanos, la atmósfera y las aguas continentales, Tabla 1

Tabla 1
Volumen de agua en diferentes compartimentos de la Tierra,
y porcentaje respecto al total, tiempo de renovación y flujo anual

	Volumen km ³ .10 ³	% del total	Tiempo de renovación	Flujo Anual Lluvia km ³ .10 ³	Evaporación km ³ .10 ³
Océanos	1300000	97,2	4000 años	385	425
Lagos de agua dulce	123	0,009			
Lagos y mares interiores (salados)	100	0,008			
Ríos, arroyos y torrentes	1,23	0,0001	1 mes	71	111
Glaciares y casquetes polares	325000	2,5			
Glaciares de regiones templadas y tropicales	1	0,0001			
Aguas del suelo	65	0,005			
Acuíferos	4000	0,31			
Aguas profundas del manto	4000	0,31			
Agua atmosférica	12,7	0,001	12 días		
Agua en seres vivos	0,4	0,00005			

Los intercambios entre los tres compartimentos están mediados por la energía solar; en dichos intercambios se utiliza la cuarta parte de la Energía solar incidente. Los océanos funcionan como una gran caldera (que ya en su origen poseía una gran cantidad de sales): en latitudes bajas el agua oceánica se calienta absorbiendo radiación y se evapora. El vapor de agua, forma en la que el agua se encuentra en la atmósfera, es transportado a zonas más frías en la que se condensa cediendo calor. El agua condensada precipita en forma líquida o sólida; la sólida se puede acumular en casquetes y glaciares, mientras que la líquida se acumula en lagos y acuíferos o tiende a dirigirse al mar por escorrentía superficial o subterránea, Figura 10.

Los organismos juegan un papel reducido en el conjunto del ciclo del agua, aunque no debe olvidarse el papel de la evapotranspiración de la vegetación, que acelera la evaporación. El agua, sin embargo, es vital para los organismos. La repartición de las precipitaciones influye decisivamente en la distribución de comunidades terrestres, aunque puede ser modificada secundariamente por el tipo de sustrato. Además, la producción primaria de los sistemas terrestres se relaciona de forma directa con la pluviosidad.

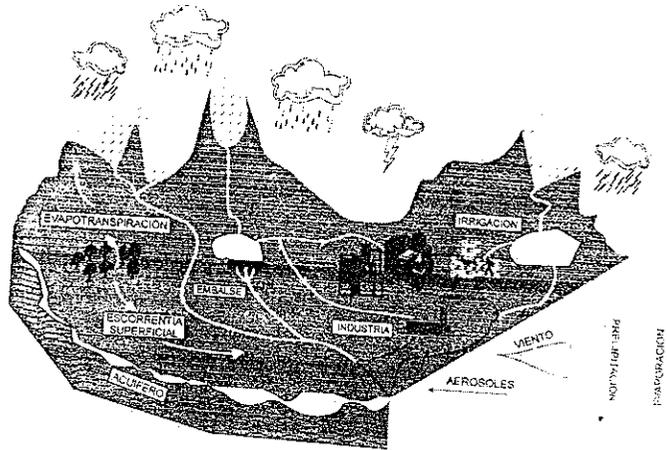


Figura 10. Ciclo general del agua con indicación de los principales procesos implicados

El conocimiento local o regional del ciclo del agua es de gran interés en medios terrestres, tanto para conocer la capacidad productiva de los organismos fotosintéticos de una zona, como para conocer la capacidad de uso por los humanos. La distribución irregular de las precipitaciones en el espacio y el tiempo, relacionables con la circulación atmosférica, provoca que en determinadas situaciones se pueda sobrepasar la capacidad de carga de las aguas continentales; esta situación es una fuente de perturbación para los organismos y también para los humanos (p.e. en el Mar de Aral debido a riego).

En España la repartición de las precipitaciones también es irregular. La variación interanual de la precipitación puede ser muy importante, provocando períodos de sequía prolongada que no pueden ser evitados con las reservas acumuladas de los años favorables. Esta situación pretende amortiguarse a nivel estatal modificando una parte del ciclo del agua, trasvasando agua de unas cuencas hidrográficas a otras, en una tendencia hacia el uso potencial máximo del agua. Pero modificaría los hábitats de las cuencas de las que se extrae agua, y podría generar problemas de mayor escala si no existe un límite superior al agua que puede ser usada, dado que un encadenamiento de años desfavorables puede ampliar los problemas a todo el territorio, sin posibilidades de solución.

4.2. Papel del hombre en el ciclo del agua

El hombre juega tres papeles importantes en el compartimento "aguas continentales" del ciclo del agua.

- Construyendo zonas de almacenamiento (embalses) o usando por encima del nivel de regeneración las reservas naturales (lagos y acuíferos). Los embalses, a

veces de gran extensión y volumen o muchos en una misma cuenca, pueden modificar el ciclo local e incluso el clima. También puede ser trascendente desde el punto de vista de arrastre de sólidos y equilibrios sedimentarios en zona de desembocadura, alterando incluso la disposición y el terreno de deltas y estuarios; un ejemplo claro es el de la presa de Assuan y el delta del Nilo en Egipto.

El uso del agua de lagos y acuíferos puede reducir el nivel "normal" de éstos, provocando una reducción importante de las reservas, lo que puede llevar acoplado procesos de salinización de los acuíferos (caso de la costa mediterránea española) o pérdida de superficie de lagos y de recursos pesqueros (es paradigmático el caso del Mar de Aral) entre otros procesos.

- Alterando el medio y modificando a nivel local el ciclo hidrológico. Una disminución de la cubierta vegetal, la eliminación de la vegetación de ribera, la creación de encauzamientos, permiten una mayor escorrentía superficial de las aguas de lluvia, eliminando agua de los tramos altos (puede afectar a la renovación de acuíferos) y acumulándola en los bajos, pudiendo provocar inundaciones. Otra forma de alteración es la ocupación de los cauces de avenida con obras públicas y construcciones, eliminando los cauces naturales del agua en crecida, lo que genera en muchos de los casos grandes perjuicios personales y económicos.
- Dentro de este apartado se pueden englobar los procesos de desertificación, provocados por alteración de la cubierta vegetal que provoca un incremento de la erosión y pérdida consiguiente de suelo que impide una correcta regeneración de la vegetación.
- Contaminando el agua, o lo que es lo mismo modificando su composición natural mediante la adición de sales, o de elementos o compuestos tóxicos para los organismos y el hombre. Esta modificación altera el biota acuático, reduce la calidad de las aguas e impide el uso del agua para el riego, el consumo humano o el uso industrial.

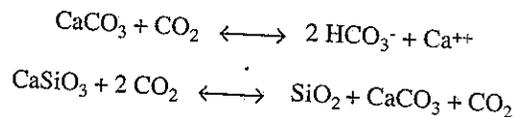
El incremento de la población humana, la producción agrícola industrializada, o el incremento de la actividad industrial provoca que en muchas áreas de la Tierra el agua (en condiciones adecuadas) sea un bien escaso. En este apartado puede englobarse el proceso de eutrofización, o aporte de sales nutrientes al agua con el consiguiente incremento de la producción orgánica (normalmente de especies indeseadas). Si no existen mecanismos de difusión de oxígeno, éste se puede agotar en el agua provocando la anoxia y la mortalidad de los organismos existentes, además de otras modificaciones.

También deben englobarse en este apartado todos los aspectos relacionados con vertidos urbanos e industriales, aunque la importancia de las modificaciones dependan del tipo de vertido y de la capacidad de asimilación del medio en el que se vierta.

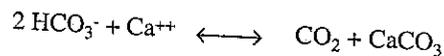
5. CICLO DEL CARBONO

El carbono presenta un ciclo mixto: sedimentario y atmosférico, puesto que los compartimentos principales son dos: las rocas carbonatadas (calizas, carbones, petróleo) y la atmósfera (CO₂) e hidrosfera (carbonatos y bicarbonatos disueltos en agua).

El primer compartimento es ralentizador del ciclo, actuando como sumidero del carbono biológicamente activo, al no ser directamente utilizable por los organismos. La movilización del compartimento sedimentario se realiza de forma natural por disolución de las rocas carbonatadas y/o silicatadas, por las siguientes reacciones reversibles



El compartimento activo para los organismos lo constituyen el CO₂ atmosférico (para la vegetación terrestre) o el CO₂ o CO₃H⁻ de la hidrosfera (para la vegetación acuática). El carbono es reducido para la síntesis de compuestos orgánicos por los organismos foto o quimosintéticos, mediante la reacción general mencionada en el apartado 2.1.1. Esta reacción es reversible mediante la respiración. Los materiales orgánicos sintetizados pueden ser respirados por la red trófica "in situ" o ser exportados a otros lugares en forma de organismos o materia orgánica particulada o disuelta (migración, arrastre de ríos, sedimentación en lagos y océanos, etc.), Figura 11. Los compuestos orgánicos no metabolizados quedan retenidos en zonas de acumulación fuera del ciclo activo: sedimentos, suelos y turbas, integrándose en el ciclo geológico. Los organismos también pueden ser responsables de la fijación del carbono en forma de esqueletos carbonatados; ejemplos importantes son los Madreporarios formadores de arrecifes de coral (hermatípicos) y los Cocolitofóridos (microalgas marinas) que pueden contribuir a la retirada de carbono hacia el compartimento inactivo. La reacción general en medios acuáticos es



lo que implica un doble proceso: la liberación de dióxido de carbono que puede ir del océano a la atmósfera, y la producción de carbonato cálcico que puede sedimentar. A modo de ejemplo, las floraciones de Cocolitofóridos en el Atlántico norte pueden representar la formación de 10 GT por año (10¹⁵ g) de carbonatos, de los que se sedimentan 1,5 GT anuales.

El hombre contribuye desde mediados del siglo pasado a la movilización del carbono inmovilizado fósil (restos de organismos o partes de organismos acumulados en sedimentos, con un contenido en carbono superior al 60% del peso) mediante la quema de combustibles (carbón y petróleo), Figura 12. Este hecho ha modificado la distribución del carbono en el compartimento atmosférico, aumentando la concentración de dióxido de carbono, y de Metano o CFC, Tabla 2.

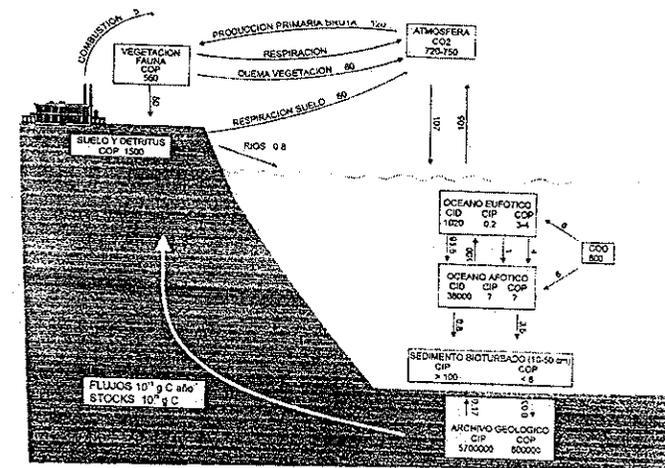


Figura 11. Ciclo general del carbono.
 COP: Carbono orgánico particulado.
 COD: Carbono orgánico disuelto.
 CIP: Carbono inorgánico particulado.
 CID: Carbono inorgánico disuelto.

Tabla 2
 Modificación de la concentración, en volumen, en la atmósfera de los gases carbonatados afectados por la actividad del hombre

	Dióxido de carbono ppm	Metano ppm	CFC-11 ppt	CFC-12 ppt
Preindustrial (1880)	280	0,8	0	0
Actualmente (1900)	353	1,72	280	484
Incremento por año	1,8	0,015	9,5	17
Tasa de incremento anual %	0,5	0,9	4	4
Tiempo de residencia en la atmósfera	50-200	10	65	130

Desde un punto de vista estrictamente teórico el balance de entradas y salidas de carbono en la atmósfera debería ser equilibrado, aunque exista una ritmicidad en la concentración en cada hemisferio, basada en los períodos de crecimiento y desaparición de la vegetación (consumo y respiración). Los datos de esta misma serie o reconstrucciones paleoecológicas reflejan un crecimiento acelerado de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera en los últimos 20.000 años, y a un ritmo no alcan-

zado en los últimos 100 años de historia de la Tierra. Las hipótesis sobre el origen de este incremento son varias, pero los últimos modelos achacan el incremento a la desaparición de la vegetación, a la pérdida de materia orgánica de los suelos y a la quema de combustibles fósiles; todos estos procesos ligados directamente a la actividad humana. Otros procesos naturales como la desaparición de turberas también se invocan para explicar este aumento

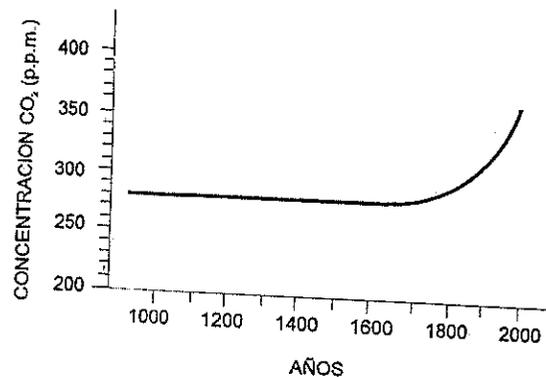


Figura 12. Variación de la concentración de CO₂ atmosférico obtenido por análisis directo en estaciones de Mauna Loa (Hawaii) y en el Polo Sur a partir de sus concentración en burbujas del hielo.

El interés actual sobre el ciclo el carbono reside en el papel de los incrementos de carbono en todas sus especies químicas en la producción del efecto invernadero y el subsiguiente calentamiento de la Tierra. La investigación en este campo se centra en conocer si existen mecanismos naturales que actúen como sumideros de carbono, y cuál es la importancia de los mismos (capacidad de retención de carbono de los organismos formadores de esqueletos carbonatados, zonas de alta productividad, transporte de Carbono inorgánico disuelto hacia aguas oceánicas profundas, crecimiento de turberas) y los factores responsables del mismo, etc.

Otros aspectos de interés de las moléculas carbonatadas son su uso como biomarcadores de procesos y paleoecología, p.e. lípidos, o el papel de algunas moléculas específicas (CFC) sobre la capa de ozono en latitudes altas.

La importancia de estos procesos globales no debe hacernos olvidar el interés por el conocimiento de los flujos locales y regionales del carbono, que permiten obtener una idea apropiada sobre el grado de organización y estabilidad de los ecosistemas; en este ámbito se encontraría la eutrofia, ya mencionada con anterioridad.

6. CICLO DEL NITROGENO

El nitrógeno tiene un ciclo atmosférico; se encuentra en forma muy estable, nitrógeno molecular (N₂), que no es utilizable de forma directa excepto por un reducido

grupo de organismos, los fijadores de nitrógeno. Las formas minoritarias, en forma de sales, son el nitrato (NO₃⁻), el amonio (NH₄⁺) y el nitrito (NO₂⁻). La importancia del nitrógeno reside en ser componente básico de moléculas imprescindibles para la actividad de los organismos, como proteínas y ácidos nucleicos. Un esquema del ciclo global del nitrógeno se expone en la Figura 13.

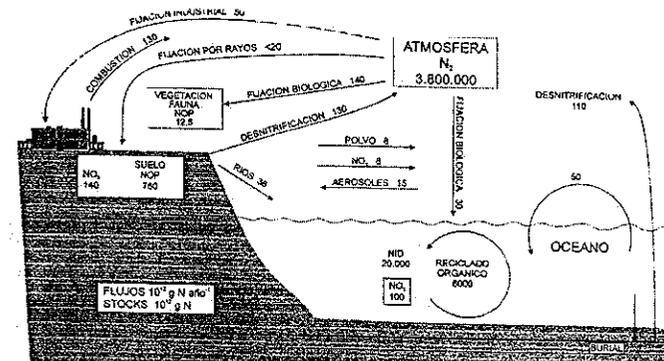


Figura 13. Ciclo general del nitrógeno.
NID: Nitrógeno inorgánico disuelto.
NOP: Nitrógeno orgánico particulado.

El paso de nitrógeno atmosférico a otras formas de nitrógeno se realiza por fijación biológica, electroquímica y fotoquímica, teniendo mayor importancia global la primera. La fijación biológica la realizan algunas bacterias y cianobacterias (algas verdeazuladas), bien libres o en simbiosis con plantas superiores (p.e. nódulos de leguminosas), que lo incorporan en forma de amonio. El paso de amonio (forma reducida) a nitrato se produce por oxidación química de forma espontánea y rápida.

Los organismos fotoautótrofos utilizan nitrato o amonio como fuente de nitrógeno, incorporándolo como aminoácidos (componentes de las proteínas) o como bases (componentes de los ácidos nucleicos). La remineralización del nitrógeno se produce por excreción (resultado del catabolismo de proteínas y bases) en forma de amonio (principalmente en organismos acuáticos) o de urea o ácido úrico (principalmente en organismos terrestres). En ambientes anóxicos se produce la desnitrificación, proceso en el que los organismos reducen las formas oxidadas de nitrógeno hasta nitrógeno atmosférico. Nitrato y nitrito son utilizadas como dadores de electrones. El nitrógeno molecular vuelve a la atmósfera, cerrándose el ciclo.

Los procesos señalados con anterioridad serían los procesos principales que implican a los organismos, y se esquematiza en la Figura 14, en la que se indican los estados de oxidación de cada una de las formas de nitrógeno.

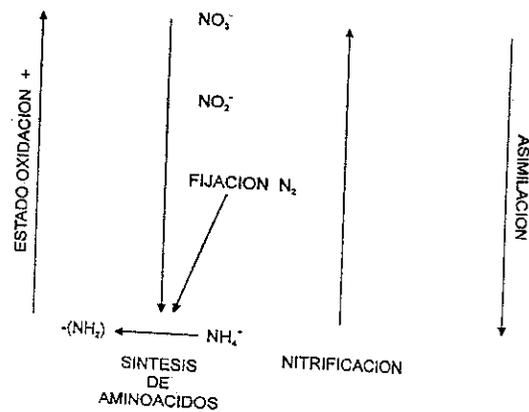


Figura 14. Estados de oxidación de diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos de nitrógeno.

El hombre modifica localmente el ciclo del nitrógeno por aporte de sustancias nitrogenadas, principalmente amonio, lo que provoca un incremento de nitrógeno inorgánico, y la disminución de la relación $NO_3:NH_4$. Ambos hechos son responsables de la eutrofización de aguas continentales y de áreas costeras confinadas. Además, mediante fijación industrial, el hombre incrementa la cantidad de nitrógeno asimilable en los continentes. Esto representa la base de la agricultura industrializada, que provoca la contaminación de aguas superficiales y acuíferos, puesto que tanto el nitrato como el amonio son compuestos tóxicos incluso a baja concentración. La emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) en procesos industriales o por combustión está implicado en los procesos de lluvia ácida (formación de ácido nítrico) y de desaparición estacional de ozono en latitudes altas.

Una modificación inversa es la quema de materiales biológicos, como los de desbrozes, que dan como resultado el descenso local en la concentración de nitrógeno orgánico, que se estima en toda la Tierra entre 15 a 46 Tg N/año (Crutzen y Andreae, 1990). Además de la pérdida de nitrógeno asimilable, parte se libera en forma de óxidos de nitrógeno, aspecto ya comentado.

El nitrógeno actúa como modulador de la fijación de carbono por los organismos autótrofos. Una mayor concentración de formas asimilables de nitrógeno provoca un incremento de la fijación de carbono (hasta que los otros elementos constituyentes de la materia orgánica pasan a ser limitantes). Durante el proceso de mineralización no se mantiene la misma proporcionalidad entre elementos, sino que la tasa de excreción de materiales nitrogenados parece ser una función de la propia concentración de compuestos de nitrógeno en el medio. Que las dos tasas, consumo y remineralización de carbono y nitrógeno, sean diferentes provoca cambios en la relación C:N del material orgánico en el espacio y en el tiempo, hecho

que tiene significación desde el punto de vista biológico; un valor de C/N más elevado significa una calidad menor de los materiales orgánicos como recurso alimentario.

7. CICLO DEL AZUFRE

Es un ciclo mal conocido. Los mayores depósitos de este elemento se encuentran en las rocas y en los océanos. En la Figura 15 se esquematizan las principales vías de intercambio entre compartimentos. La importancia cuantitativa del azufre para los organismos es limitada, puesto que se encuentra sobre todo en aminoácidos como radical sulfidrilo. Cada vez se presta más atención a moléculas como el dimetilsulfopropionato (DMSP), sintetizadas por algunas algas (Cocolitofóridos, p.e.) como regulador osmótico. La importancia de este ciclo estriba en su papel en los equilibrios de oxidación-reducción, y en su interacción en los ciclos de otros elementos, muy especialmente el fósforo.

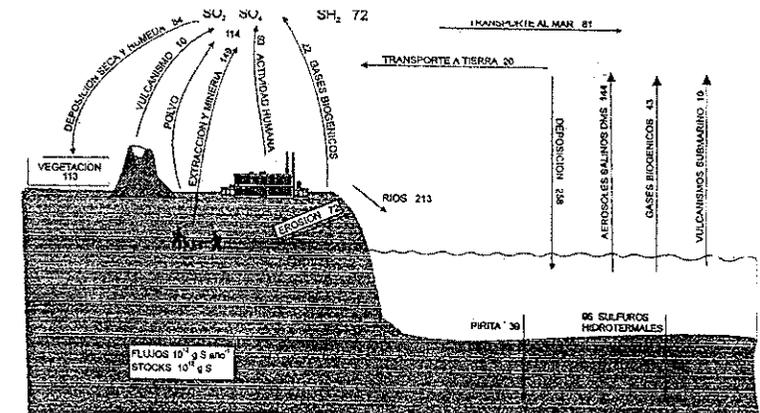


Figura 15. Ciclo general del azufre.

La especie química en la que se encuentra el azufre inorgánico en el medio depende de la concentración de oxígeno en el mismo, y de las necesidades de oxígeno para oxidar materia orgánica. Cuando la concentración de O_2 es elevada la oxidación se realiza por vía aerobia y el azufre se encuentra en el medio en forma de sulfato. Cuando existen limitaciones de oxígeno, el sulfato actúa como dador de oxígeno para bacterias anaerobias (Desulfobivrio, p.e.), transformándose en ácido sulfídrico (SH_2), especie típica de ambientes anaerobios, Figura 16.

El ácido sulfúrico puede actuar como dador de electrones para bacterias quimio-sintéticas que acumulan azufre intracelular (p.e. Beggiatoa). Otras bacterias quimio-sintéticas depositan azufre extracelular (p.e. Thiobacillus) interactuando algunas de ellas con el ciclo del nitrógeno, reduciendo formas inorgánicas de nitrógeno a N_2 (ver ciclo del nitrógeno). Un esquema de los procesos implicados se esquematiza en la Figura 16

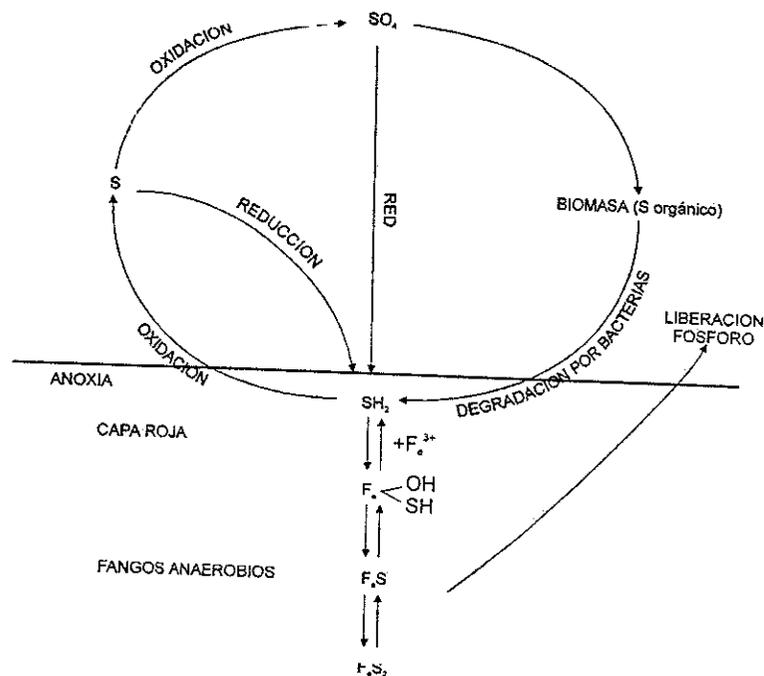


Figura 16. Procesos implicados en los intercambios entre diferentes especies de azufre y su relación con los gradientes de oxidación-reducción.

Actualmente se analiza el papel de un compuesto azufrado, el DMSP y su derivado el DMS (dimetilsulfuro, gas no soluble en agua), como interaccionante con el flujo del carbono, y por tanto regulador biológico del clima, según el esquema de la Figura 17 (Charlston et al., 1987). El fitoplancton sería el responsable de la producción de DMSP, y el zooplancton responsable de su transformación a DMS, gas insoluble, que pasaría a la atmósfera donde se transformaría en ácido sulfúrico y consiguientemente en núcleo de condensación de nubes. La disminución de irradiancia derivada de la formación de nubes disminuiría la producción primaria, lo que a la larga disminuiría la síntesis de DMSP y la propia formación de nubes, en un circuito recurrente negativo

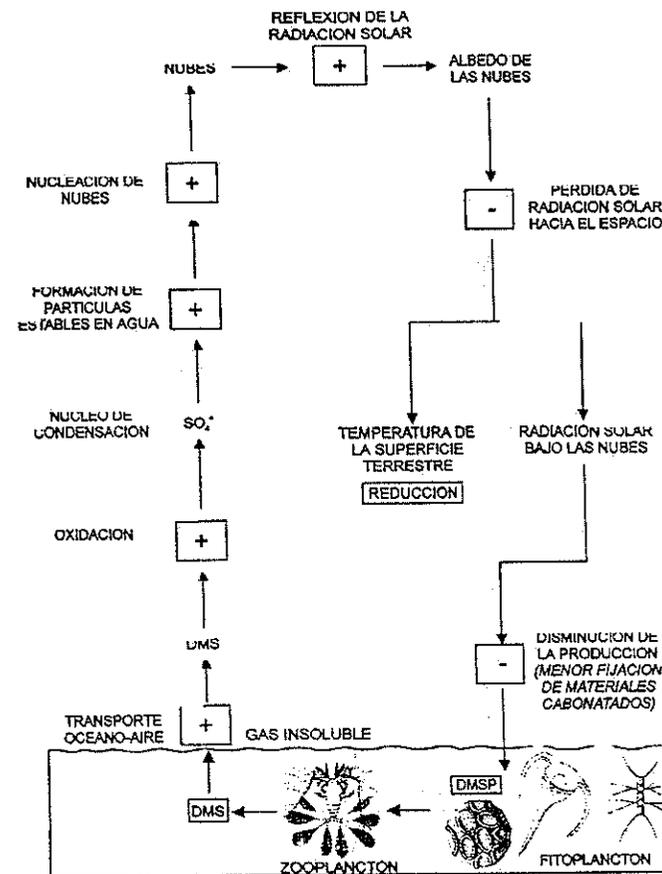


Figura 17. Relación entre los ciclos de azufre y carbono en aguas oceánicas sugerido por Charlston et al. (1987), actualmente en fase de comprobación experimental.

8. BIBLIOGRAFIA

BEEBY, A., "Applying Ecology", Chapman & Hall, Londres, 441 pp, 1993.
 BEGON, M., HARPER, J.L. y C.R.TOWNSEND, C.R., "Ecología. Individuos, poblaciones y Comunidades", Ed. Omega, Barcelona, 886 pp., 1987.
 CHARLSON, R.J., LOVELOCK, J.E., ANDREAE, M.O. y WARREN, S.G., "Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate", Nature, 326(16), 655-661, 1987.
 CRUTZEN, P.J. y ANDREAE, M.O., "Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles", Science, 250, 1990.
 DUVIGNEAUD, P., "La síntesis ecológica", Ed. Alhambra, Madrid, 306 pp., 1978.

- HAMILTON, C.L. (ed.), "Química y Ecosfera", Ed. Hermann Blume, 412 pp., 1976.
- HOUGHTON, R.A. y WOODWELL, G.M., "Cambio climático global", Investigación y Ciencia, (Jun), 8-17, 1989
- JORGENSEN, S.E. y JOHNSEN, I., "Principles of environmental Science and Technology", Elsevier Sci.Pub., Amsterdam, 516 pp., 1981.
- KREBS, CH.J., "Ecología", Ed. Pirámide, Madrid, 782 pp., 1986.
- LOVELOCK, J.E., "GAIA, una nueva visión de la vida sobre la Tierra", Ed. Hermann Blume, Madrid, 185 pp., 1979
- MARGALEF, R., "Limnología", Ed. Omega, Barcelona, 1010 pp., 1983
- MARGALEF, R., "Planeta azul, planeta verde", Prensa Científica, Barcelona, 265 pp., 1992.
- ODUM, E.P., "Ecología: bases científicas para un nuevo paradigma", Ed. Vedral, Barcelona, 282 pp., 1992.
- ODUM, H.T., "Systems Ecology. An Introduction", John Wiley & Sons, Nueva York, 644 pp., 1983
- PIANKA, E.R., "Ecología evolutiva" Ed. Omega, Barcelona, 365 pp., 1982.
- SCHLESINGER, W.H., "Biogeochemistry. An analysis of global change", Acad. Press, San Diego, 443 pp., 1991
- SIEGENTHALER, U. y SARMIENTO J.L., "Atmospheric carbon dioxide and the ocean" Nature, 365, 119-125.
- WESTBROECK, P. et al., "A model system approach to biological climate forcing. The example of *Emiliania huxleyi*", Global and Planetary Change, 8, 27-46, 1993
- WETZEL, R.G., "Limnología", Ed. Omega, Barcelona, 672 pp., 1981