



Introducción a la ecología

De la biosfera
a la antroposfera

Josep Peñuelas

Biblioteca
Científica
Salvat

Introducción a la ecología

De la biosfera a la antroposfera

Josep Peñuelas

SALVAT

Diseño de cubierta: Ferran Cartes / Montse Plass

Escaneado: thedoctorwho1967.blogspot.com.ar

Edición digital: Sargont (2018)

© 1993 Salvat Editores, S.A., Barcelona

© Josep Peñuelas Reixach

Por autorización de Editorial Barcanova, S.A., Barcelona

ISBN: 84-345-8880-3 (Obra completa)

ISBN: 84-345-8893-5 (Volumen 13)

Depósito Legal: B-27527-1993

Publicada por Salvat Editores, S.A., Barcelona

Impresa por Printer, i.g.s.a.. Octubre 1993

Printed in Spain

ÍNDICE

EXORDIO

PRIMERA PARTE

LA BIOSFERA

I. LA RIQUEZA Y VARIEDAD DE LA VIDA

II. LA MATERIA Y LA ENERGÍA

III. EL ESPACIO Y LA ORGANIZACIÓN

IV. EL TIEMPO

SEGUNDA PARTE

LA ANTROPOSFERA

V. LA ANTROPOSFERA EXPLOTA LA BIOSFERA

VI. LA ANTROPOSFERA ACTÚA SOBRE EL CANAL
ECOLÓGICO DE LA BIOSFERA

VII. LA ANTROPOSFERA ACTÚA SOBRE EL CANAL
GENÉTICO DE LA BIOSFERA

VIII. EL FUTURO: EL REINO DE LA EXPONENCIAL

EPÍLOGO. MÁS ALLÁ DE GAIA. HOMENAJE A LOVELOCK

BIBLIOGRAFÍA

EXORDIO

BIENVENIDA A LA CRESTA DE LA OLA

«Bienvenido a la cresta de la ola», me dijo, entre irónico y afable, mi amigo Riochi cuando llegue a Stanford, en la primavera de 1986, becado por la CIRIT (Comissió Interdepartamental per a la Recerca i la Innovació Tecnològica de la Generalitat de Catalunya) para realizar un trabajo sobre el metabolismo gaseoso de las plantas. Estábamos, mi amigo japonés y yo, en el Silicon Valley, atraídos, como tantos otros, por lo que los californianos llaman la «cresta de la ola». Luego, a medida que pasaban las semanas y los meses —por cierto realmente enriquecedores, y sobre todo muy placenteros y divertidos—, le di vueltas a la bienvenida de mi amigo, pero no en el sentido que él le había dado: tecnología punta, alto nivel de vida, cultura, diversión, deportes, arte, modernidad, posmodernidad, etcétera, sino yendo un poco más allá, y preguntándome por lo que viene después de la cresta. De ahí, de comparar la cresta de la ola de la modernidad con la cresta de la ola evolutiva de la biosfera, surgió la idea de escribir este libro. En él se estudia el origen, crecimiento, estructura y función de la ola de la vida, de la biosfera —la capa viva del planeta—, con su parte culminante, la antroposfera —la capa humana—, y sus evoluciones posibles: seguir creciendo, estabilizarse o fenecer, caer al precipicio.

Porque, en efecto, estamos en muchos sentidos en esa cresta de la ola, en la parte superior de la curva evolutiva de la vida donde se ha subido la antroposfera amenazando con aplastarla: y en la parte superior de la curva sigmoidea de crecimiento de la población, una curva muy parecida a la que describe el crecimiento de un organismo o el de una civilización, hasta alcanzar un tamaño o un apogeo máximo (fig. I).

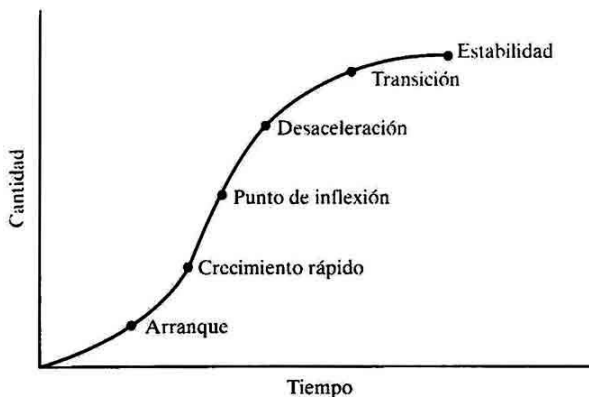
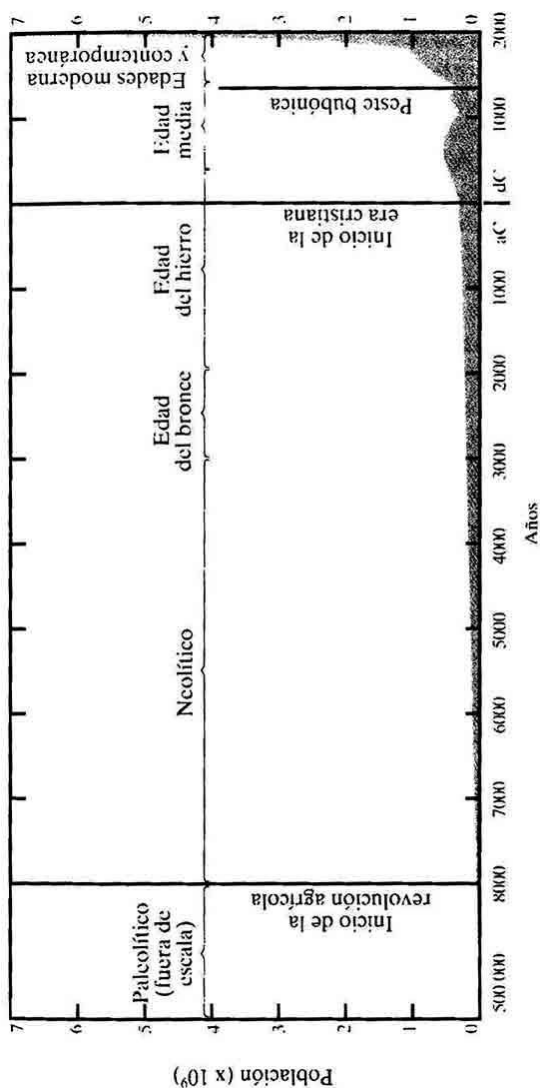


Fig. 1. Curva de crecimiento logística o sigmoidea, con sus fases.

Cuando la población humana no ha estado limitada por factores intrínsecos, ni por falta de recursos o de espacio, ni por la acción de depredadores, parásitos y enfermedades, ha seguido un crecimiento exponencial. Esto ha tenido lugar en la última etapa de la evolución, en la que la vertiente cultural y tecnológica se ha superpuesto a la biológica y la ha superado; Lamarck le ha ganado la partida a Darwin (véase la introducción a la segunda parte), y el crecimiento, tanto de la población como de su tecnología y su dominio, ha sido exponencial (fig. 2): la ola ha ido levantando su cresta y nos hemos convertido en una gran plaga, quizá la mayor de la historia (aunque quién sabe si no lo fueron también los dinosaurios). La causa está en la amortiguación de los controles o mecanismos de *feedback* que habían mantenido la población dentro de unos límites definidos hasta hace muy pocos miles de años (fig. 2). Pero, en cualquier momento, a la población humana le puede ocurrir lo mismo que a las demás poblaciones de seres vivos (véase 3.2.3), que tienden a acercarse al límite de las posibilidades nutritivas del medio o a la aparición de otros factores de control. En nuestro caso, además, y por primera vez en la evolución, nosotros mismos, la especie *Homo sapiens sapiens*, constituimos otro factor de control, somos capaces de autoextinguirnos.



Evolución de la población antroposférica, con el actual levantamiento exponencial de la ola de crecimiento.

El hombre y la antroposfera han surgido y son parte de la biosfera. Para entender la estructura y función de estas capas planetarias es necesario entrar en el mundo de la ecología. En este libro pretendo presentar de forma inteligible los temas de ese mundo, especialmente los que más en boga vienen estando en los últimos años. Por lo tanto, va destinado no sólo a estudiantes de biología y ecología, sino también a todas las personas sensibles al mundo de la ciencia y sus avances, así como al papel y futuro del hombre en el planeta. Para ellas, la primera parte (la biosfera) quizá resulte un poco tediosa por la avalancha de información resumida, a pesar de que he procurado limitar bastante los términos más específicos de la jerga científica, aunque tratando siempre de no perder exactitud y rigor. Como en cualquier otra ciencia, la mayoría de las cuestiones tratadas no están resueltas definitivamente, no son verdades reveladas o hechos consumados: en muchos de los temas se plantean problemas, se analizan datos, se generaliza y se pronostica, pero en todos los casos mi deseo es que el lector los analice y discuta por sí mismo. La mayoría de los capítulos se alejan del academicismo de muchos otros libros sobre ecología. Y ello es porque coincido plenamente con Parker cuando dice, en su libro *Sex, Science and Society*, que «la ciencia puede ser seria sin ser sacrosanta». Quizá se pueda calificar de periodístico el tratamiento que se hace de algunos temas. En realidad así es, primero con la intención de hacer más amena la lectura y, segundo porque, en efecto, parte del material que aquí he reunido ha sido publicado de forma regular en las secciones de ciencia de *La Vanguardia* y más ocasionalmente en las de otros periódicos (*El País*, *El Correo de Andalucía*, *Diario de León*. *Hora Nova*, *Papers Empordanesos*). Vaya para *La Vanguardia* y para los demás mi agradecimiento por impulsarme a escribir sobre estos temas y por permitirme utilizarlos aquí.

Los biólogos siguen distintos estilos de trabajo y presentación de sus ideas y resultados. Algunos se deleitan en la diversidad y pasan su vida entera describiendo variaciones intrincadas sobre temas comunes. Otros tratan de ver detrás de las diferencias una unidad que reduzca los millones de especies y de acontecimientos a unos pocos temas y leyes comunes. A esta

última visión se aproxima más este libro por dos razones: por mi interés en ella, y por la inevitable limitación de páginas. Abordar una materia como la ecología, con un cuerpo de conocimientos tan vasto y complejo, en una pequeña obra como ésta, es particularmente difícil, por no decir imposible. La presentación ortodoxa de toda una ecología, ciencia de síntesis de otras muchas, es alargadle tanto como se quiera, pues el «oikos» es nuestro hogar, y a medida que aumenta el conocimiento humano, aumenta exponencialmente el tamaño de ese hogar. Por eso, he escogido unas cuestiones que, aunque no son tratadas exhaustivamente, permiten aportar una visión del mundo de la ecología y pretenden atraer el interés sobre sus temas. He concedido un peso importante a mis puntos de vista, y aunque se ha procurado presentar con objetividad y eclecticismo los principales conceptos, la línea argumental y algunos de los capítulos y temas tratados más extensa e intensivamente están fuertemente motivados por mi particular y parcial visión y selección de temas y materiales. Hay en esta actitud cierto ánimo de provocación, de polémica. Espero transferir interés por los organismos y su medio, de tal modo que el lector se aventure en la observación del ambiente, natural y artificial, lo descubra por sí mismo y discuta lo aquí explicado. Aunque trato bastantes de los temas que configuran un curso de ecología, lo hago abreviadamente y no de forma completa. El lector interesado en profundizar puede estudiar los textos de Margalef, Odum, Ricklefs, Conlivaux, etc., citados en la bibliografía. También me he alejado un poco de la teoría de sistemas, sobre la cual tenemos en nuestro país a un magnífico profesor, uno de sus padres, el doctor Margalef. Sus libros están al alcance de cualquier interesado en este tema, que aquí simplemente se va a esbozar.

En esta obra se sigue un orden (que podría haber sido cualquier otro, dada la estrecha interrelación de todo con todo): va de la descripción de la vida a la ecología social, pasando por la energía, la materia, los individuos, las poblaciones y los ecosistemas en el tiempo y en el espacio. He entrelazado los temas dándoles la ligazón clásica de los textos de ecología: descripción de la vida, flujo de energía, ciclos de materia, ecología de

poblaciones, dinámica de comunidades y ecología humana. Esta ordenación permite seguir cómo en la biosfera surge la antroposfera y con ello tiene lugar un cambio transcendental, no tan sólo de la capa viva, sino del mismo planeta, y quién sabe si, con el tiempo, también de otros lugares del universo. Ese va a ser el hilo conductor de los temas que va a hacer posible establecer, o por lo menos yo me tomo esa licencia, la hipótesis de una antroposfera situada en la cresta de la ola. Quizá los últimos capítulos sean más especulativos que basados en hechos científicamente comprobados, e incluso se puede pensar que algunos se acercan a la ciencia ficción. Es especialmente acerca de esos que el lector hará bien en discutir y opinar para sí. Los restantes no se alejan de la ortodoxia de esta ciencia, aunque presentados desde mi punto de vista, sin duda influido por mis estudios, por mis maestros preferidos (Margalef, Colinviaux, Hutchinson, Gould, Lovelock y Gribbin, de quienes he lomado muchas de las ideas y temas sobre la biosfera) y por mis vivencias personales. Entre estas últimas juega un papel destacado la tramontana, el viento de mi Empordà, que con su enorme carga eléctrica ha excitado mi imaginación y generado la voluntad de escribir estas páginas. Las puestas de sol vividas en sus montañas, con la mirada en el mar y el viento en la espalda, inspiraron este libro en esa comarca, conjunción magnífica de cielo, montaña y mar, la mejor síntesis de la ecología.

La bibliografía no es exhaustiva ni mucho menos, pero sí un poco demasiado culta o técnica dado el nivel de esta obra. La he elaborado así con la idea de presentar las referencias más significativas, en especial las de síntesis y las más modernas, que van a facilitar al lector interesado profundizar sobre los temas y desenredar el ovillo de las fuentes bibliográficas. Como es tópico, debo «jurar» que soy el único responsable del mal uso que se pueda haber hecho de la información presente en los trabajos consultados para elaborar este ensayo. A lo largo de él podrán apreciarse las huellas de los eminentes ecólogos citados; quizá un buen fin de lo que sigue sea el animar al lector a consultar sus obras.

A la hora de los agradecimientos, vayan para el profesor Margalef, que me introdujo en este fantástico mundo de la ecología cuando yo me dedicaba al de la biología molecular. Él ha generado muchas ideas en conversaciones de pasillo y de recreo. Han leído y comentado el manuscrito el propio doctor Ramon Margalef, y mis compañeros y amigos doctor Joan Valés, Joaquim Murillo, doctor Francesc Sabater, doctor Mikel Zabala, doctor Jordi Massó y Josep Lluís Monje. El director de mi Departamento. Joandomènec Ros, me ha ayudado en la búsqueda bibliográfica. Finalmente Teresa, mi mujer, me ha ayudado, indirectamente con su paciencia en la vida cotidiana, y de forma más directa en la elaboración del libro: «moltes gràcies». A todos ellos, y en especial a Teresa, dedico este libro.

LAS GRANDES CUESTIONES DE LA ECOLOGÍA. HOMENAJE A MARGALEF

Cuando iniciaba mi cuarto curso de licenciatura (1978-1979), llegó al aula el profesor de ecología —un personaje de aspecto entre descuidado, travieso y sabio, llamado Margalef— y dijo: «La ecología, asignatura que vamos a estudiar este curso, es, como se ha dicho alguna vez, aquello que le queda a la biología cuando todo lo importante ha recibido ya algún nombre». Aunque pueda parecer una frase fácil o un chiste —o por lo menos así me lo pareció en un primer momento—, no es tal; es una definición profunda que prima la característica de síntesis de esta ciencia, más conocida como la que estudia las relaciones de los seres vivos con su ambiente (tanto biológico como físico-químico). Su materia de estudio está constituida por los niveles superiores de organización biológica (fig. 3).

La ecología —el estudio del hogar, si tenemos en cuenta el significado griego del vocablo acuñado por Haeckel en 1869— nació como ciencia más o menos autónoma hace alrededor de un siglo. La gestaron la teoría de la selección natural de Darwin, las grandes expediciones oceanográficas y a territorios exóticos y el comienzo de los problemas demográficos ligados a la revolución industrial. Desde entonces ha ido avanzando en

el conocimiento de la cubierta viva del planeta, la biosfera, y en el entendimiento de la distribución y abundancia de los organismos a través del estudio de la relación con sus hábitats y con sus hábitos.

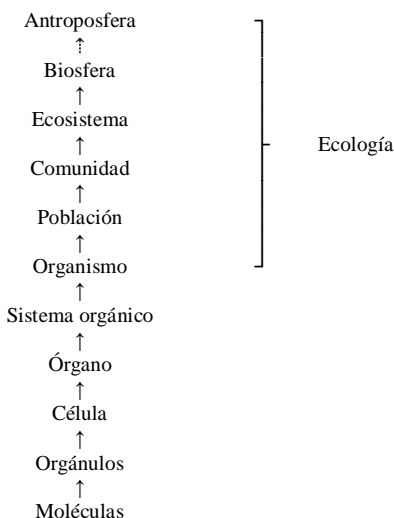


Fig. 3. Niveles de organización de la materia viva que constituyen la materia de estudio de la ecología.

Vivimos en un planeta azul por su abundante agua y por su atmósfera, en equilibrio con el agua y con los organismos. Estos son los que lo han cambiado con respecto a la primitiva Tierra, que se formó hace unos cinco mil millones de años. El cambio es una de las características más notorias de nuestro universo y por tanto también de nuestro planeta. No es de extrañar, pues, que durante ese tiempo, le hayan ocurrido muchas cosas no sólo a la biosfera, sino también a la litosfera, entre las cuales destacan los movimientos de las placas continentales, que flotan como escoria sobre una masa central más densa. Hace al menos tres mil millones de años apareció la vida, que luego se ha ido extendiendo y diversificando en muchas especies de plantas, animales, hongos y bacterias que, junto con sus

relaciones entre sí y con el medio, constituyen el objeto de estudio de la ciencia ecológica. Sin embargo, aunque los cambios son continuos, se da también un hecho notorio puesto de manifiesto en la famosa teoría de Lovelock sobre Gaia, la madre Tierra, que nos recuerda que, una vez cambiadas las condiciones iniciales, las grandes características físico-químicas de la Tierra han variado relativamente poco, favoreciendo la vida y su evolución, y que ha sido en la capa viva donde han tenido lugar los cambios. Parece como si el planeta y la biosfera actuaran como un todo homeostático, regulador de las condiciones que han posibilitado su mantenimiento y desarrollo. Esta autorregulación tiene su máxima expresión en la composición atmosférica y en el clima, como veremos en 6.6 y 6.8. De la importancia del control biológico sobre el ambiente geoquímico da prueba la comparación de la atmósfera y de la temperatura de Marte. Venus, la Tierra y una hipotética Tierra sin vida (tabla 1).

<i>Gas</i>	<i>Planeta</i>			
	Venus	Tierra sin vida	Marte	Tierra tal como es
Dióxido de carbono	98%	98%	95%	0.03%
Nitrógeno	1.9%	1.9%	2.7%	79%
Oxígeno	Vestigios	Vestigios	0,13%	21%
Argón	0.1%	0,1%	2%	1%
Temperaturas de superficie (en °C)	477	290±50	-53	13

Tabla 1. Comparación de la atmósfera de Venus, la Tierra. Marte y una hipotética Tierra sin vida. (De LOVELOK 1983).

La vida es una elaboración (o sí se quiere una sublimación) del mundo físico que ha desarrollado un conjunto de propiedades que de él la distinguen, entre las cuales el movimiento y la reproducción son las más evidentes. Lógicamente, ambos mundos son estrechamente interdependientes: la vida está íntimamente ligada al mundo físico por tres necesidades esenciales: el agua como medio para los procesos biológicos, la energía para mover la máquina viviente, y los elementos químicos (carbono, nitrógeno, fósforo y otros) como nutrientes químicos

esenciales que constituyen la materia constructora de la vida. Esos tres recursos, agua, energía y nutrientes, son tratados aquí, en el mundo de la ecología, ciencia ambiental y evolucionista que pretende descubrir cómo se reparten entre los individuos de diferentes especies, y cómo en ese reparto se regulan las especies, las poblaciones y hasta los sexos. También es estudiada la gran paradoja del elegante diseño de plantas y animales, tan bien adaptados al aprovechamiento de esos recursos, como resultado de procesos cuyo inicio es básicamente fortuito, pero sobre los que ha actuado la selección —reproducción diferencial y supervivencia de individuos con diferentes características hereditarias—, que no trabaja aleatoriamente sobre la infinita variedad proporcionada por la recombinación genética. Por la misma razón se pueden apreciar comunidades bien adaptadas. Todo esto conlleva el estudio de los procesos desarrollados en los distintos hábitats y de la física y la química de la biosfera, al mismo tiempo que se procura averiguar qué regula la composición del aire, la salinidad de los océanos o el clima.

Dentro del reino de la ecología cabe, pues, un amplísimo abanico de temas: los ciclos de los nutrientes en los bosques, el equilibrio genético entre la selección y la mutación, los balances energéticos de los ecosistemas, los sistemas de polinización y dispersión de las plantas, las oscilaciones en las poblaciones de depredadores y de sus presas, etcétera. Todos parecen unificarse bajo la égida de unos pocos principios básicos (fundamentalmente unos cuantos letreros de «prohibido el paso»), que constituyen el reto y la fascinación de la ecología. Dos de los importantes son las primeras leyes de la termodinámica: la energía se conserva y las transformaciones energéticas producen un aumento de la entropía; otro es que dos cosas no pueden ocupar un mismo punto: otro es la irreversibilidad del tiempo... Las leyes de la ecología y de la termodinámica impiden aceptar cualquier hipótesis sobre el origen y moldeado de la vida que no implique el incremento de organización sobre un sistema disipativo de energía. Los sistemas vivos se descomponen cuando dejan de funcionar: su persistencia estructural y funcional son inseparables, de manera que la estructura de la materia viva es un sistema que disipa la energía y al mismo tiempo fruto de la

que incorpora (ODUM 1980). La flecha del tiempo va en ese sentido, en el de la acumulación de información, de organización, consecuencia de la energía disipada. Uno de esos grandes principios es, pues, que una misma energía no se puede usar dos veces de la misma manera. Una vez ha interactuado con la materia, ni aquélla ni ésta son cualitativamente iguales. Con el tiempo aumenta la complicación de nuestro mundo, se acumulan los trastos en el desván cósmico, dice Margalef.

Las grandes cuestiones infantiles

Dentro de ese mundo de la ecología también caben cuestiones como por qué el cielo es azul o por qué la hierba es verde... ¿Qué padre no se ha visto impotente y desmoralizado ante las preguntas con respuestas al parecer muy obvias y evidentes de sus pequeños vástagos? Pensaba que conocía tales respuestas, pero no recordaba que de pequeño también él se las había planteado. Son las cosas que creemos saber, que nos circundan cotidianamente y que nos parecen tan elementales, las que presentan las mayores dificultades cuando nos vemos ante el desafío de tener que explicarlas. Cuando dejamos de ser niños solemos perder nuestra capacidad de admiración y sorpresa, aunque más tarde la podemos recuperar en parte. Lo maravilloso, si es frecuente, deja de llamar la atención: actitud bastante práctica, pues nos permite dedicarnos a los quehaceres cotidianos. Sin embargo, saber prescindir de ellos de vez en cuando y recuperar la capacidad de maravillarnos propia de la infancia es la fuerza motriz que nos lleva a revivir muchas ideas y preguntas ocultas sobre nuestro entorno —y sobre cualquier materia.

Es a la ecología a la que le toca buscar las respuestas a una serie larguísima de interesantes cuestiones que surgen de su materia de estudio, nuestro hogar. Muchas de ellas me las he planteado tras leer los amenos libros de Colinvaux. ¿Por qué existen especies discretas y no una capa continua de biosfera? ¿Por qué hay tantas? ¿Por qué hay más especies en unos lugares que en otros? ¿Por qué unas son más comunes que otras? ¿Por qué los individuos tienen la forma que tienen y hacen lo

que hacen? ¿Cómo se regulan las poblaciones? ¿Por qué existen sexos distintos? ¿Por qué coinciden los mapas de vegetación, suelos y clima? ¿Por qué tras la destrucción de una comunidad viene la sucesión? ¿Por qué no hay árboles en el Ártico? ¿Por qué los árboles son perennifolios a bajas y altas latitudes y caducifolios a las intermedias? ¿Por qué tienen diferentes formas las hojas? ¿Cómo se mantienen las composiciones atmosférica y oceánica? ¿Cuál es el límite de la biomasa de la biosfera y cuál el límite de la energía de que dispone...?

Pero, además, a la ecología le ha surgido un interesante nuevo campo de estudio, la capa humana del planeta, que con su manipulación del ambiente para su propio provecho y su creciente potencial (tratados en la segunda parte de este libro) merece ser elevada a la categoría de nueva capa terrestre: a esa capa, surgida de la biosfera, y que amenaza con envolverla y cubrirla totalmente, la he llamado «antroposfera». Hay también numerosas preguntas que plantearse en el estudio de las interacciones de la especie *Homo sapiens sapiens* (repetir *sapiens* no es enfatizar nuestra —menguada— sabiduría, sino una obligación impuesta por las oscuras leyes de la nomenclatura zoológica) con su hogar: ¿Por qué produce más comida la agricultura occidental de monocultivos que la vegetación silvestre? ¿Por qué esta agricultura no va tan bien en los trópicos? ¿Cuál es el papel de los océanos en la producción de los alimentos? ¿Qué peligro representan la radiactividad o los plaguicidas o las sustancias recalcitrantes a la biodegradación? ¿Tiene límite la energía utilizable por la sociedad humana? ¿Por qué crece la población humana? ¿Está la atmósfera en peligro? ¿Podemos alterar el clima? ¿Construirá nuevos organismos, quizá humanoides, la ingeniería genética? ¿Llegará a desaparecer la biosfera totalmente absorbida por la antroposfera? ¿Está próxima la autoextinción de la especie humana? ¿Será el ordenador de silicio la nueva especie dominante sobre la Tierra, en sustitución del hombre de carbono...?

A todas estas cuestiones nos iremos aproximando en las páginas que siguen. La mayoría están lejos de presentar soluciones claras y aceptadas unánimemente: por el contrario, son mo-

tivo de controversia y estudio dentro de la comunidad científica, controversia que a menudo trasciende el conjunto de la sociedad humana.

La ecología no es sólo el resultado de disquisiciones de «sabios» alejados de la sociedad. Como en cualquier ciencia básica, podemos utilizar algunos de los conocimientos adquiridos para mejorar nuestro presente y nuestro futuro. Hay numerosos ejemplos de ello, desde la necesidad de evitar la roturación de la selva tropical hasta el conocimiento del nocivo efecto acumulativo del DDT en la cadena trófica. Investigación básica y aplicada van absolutamente ligadas, de tal forma que interactúan en mutuo beneficio: yo diría que son lo mismo.

Otra cosa es el debate ecologista, que no ecológico. Muchos de los que estén leyendo estas líneas quizá no hayan distinguido entre ambos adjetivos, y de hecho en inglés sólo hay un término común: otros tendrán bien presente el —entre los ecólogos— manido aforismo, muchas veces criticado por elitista: «ecología es a ecologismo como sociología es a socialismo». Esto puede dar una idea precisa de la distancia que los separa. El ecologismo no es una ciencia, es un sentimiento: es, si se quiere, una filosofía activista, con la que yo simpatizo en muchas ocasiones, y con la que no comparto algunas actitudes dogmáticas en otras. Los interesados en los temas de ecologismo encontrarán referencias en la bibliografía (FOLCH 1978).

La ecología, como toda ciencia, pero quizá más acentuada-mente que ninguna, procede, pues, a través de la interacción con las demás ciencias, no sólo las biológicas sino también la física, la geología, la química, las matemáticas, la informática, las humanidades, la lingüística, etc., que le proveen de herramientas e ideas estimulantes. Quizá un paradigma de esta aplicación interactiva de las ciencias lo constituya uno de los grandes maestros de la ecología, ese personaje entre sabio y travieso que llegó al aula de cuarto de biología para sorprender y despertar nuestras dormidas mentes aquel octubre del 78, el profesor Margalef.

PRIMERA PARTE

LA BIOSFERA

LA ENERGÍA ORGANIZA LA MATERIA VIVA EN EL ESPACIO A LO LARGO DEL TIEMPO. HOMENAJE A EINSTEIN

Einstein nos aportó una teoría maravillosa por la sencillez de su simetría, belleza y elegancia en la descripción de los aspectos trascendentales del universo. Esa teoría tiene dos principios fundamentales: el mantenimiento de iguales leyes físicas en todas partes y para todos los observadores, y la existencia de una cuarta dimensión —el tiempo—, que es en todos los aspectos equivalente a las tres dimensiones espaciales habituales. La materia es una misma cosa con la energía (recuérdese la conocida ecuación $E = mc^2$ en la que E , m y c son símbolos que representan energía, masa y velocidad de la luz respectivamente) y curva el espacio-tiempo (fig. 4).

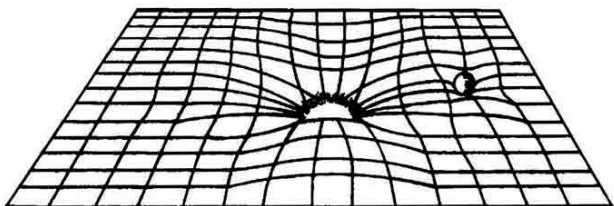


Fig. 4. materia-energía moldea el espacio-tiempo. (De CHAISSON 1986)

Si esta teoría de la relatividad describe con sencillez los principios básicos del funcionamiento del universo, parece lógico que nos inspiremos en ella para introducirnos en la descripción y estudio del funcionamiento de la materia viviente de nuestro universo más próximo, la Tierra. Según Einstein, la materia, y la energía equivalente, curvan el espacio-tiempo, es decir, lo moldean. Vamos nosotros a estudiar la ecología, la organización y funcionamiento de la biosfera y de la antroposfera, a través de esos cuatro factores, materia, energía, espacio y tiempo, en los siguientes capítulos. En ellos se verá cómo la energía solar organiza (moldea) la materia viva en el espacio a lo largo del tiempo.

Las especiales características de la materia viva, posible por las condiciones asimismo especiales de nuestro planeta, como una temperatura que ha permitido la existencia de agua líquida, han hecho que esta materia viva haya modificado con su acción muchas características de su entorno, haya pasado a autoorganizarse y a organizar la materia inerte y el espacio, hasta llevar a algunos científicos como el famoso Lovelock a establecer la mencionada hipótesis de una madre tierra, Gaia, con capacidad de homeostasis, de regulación de las condiciones más adecuadas para el automantenimiento. La interacción de ese entorno con los seres vivos constituye la materia de estudio de la ecología. En esta primera parte del libro, bajo el título de «La biosfera», se agrupan los temas que de forma más usual son tratados por la ecología «académica».

I. LA RIQUEZA Y VARIEDAD DE LA VIDA

1.1. LA VIDA NO ES UNA ALFOMBRA

Las características de la Tierra y de sus cubiertas fluidas crean una extrema variedad de condiciones de vida que permiten el desarrollo de una fabulosa diversidad de seres vivos. En efecto, la vida en la Tierra no es una alfombra continua, uniforme y envolvente. Se presenta, por contra, formando una enorme variedad de unidades discontinuas que plantean una de las grandes cuestiones de la biología. ¿Por qué hay tantas clases diferentes de seres vivos?

La naturaleza nos sorprende con una enorme diversidad de formas vivas y de interacciones de éstas entre sí y con el ambiente. Y nos sorprende por cuanto se podrían, ¿por qué no?, aglutinar en una película viva que cubriese el planeta, o simplemente en unas pocas formas, por ejemplo en una planta, un animal y un descomponedor. Y sin embargo, si paseamos por un bosque (y para hacerlo más notorio, escogemos uno tropical), observaremos cientos de árboles y plantas distintos. A primera vista parece que todos hacen lo mismo: utilizar la energía solar, captada por sus hojas, para convertir el CO_2 atmosférico, y el agua y las sales minerales del suelo en moléculas orgánicas que constituyen su estructura. ¿Por qué tantas especies de plantas? ¿Por qué no una sola que realice la misma función que todas ellas? De hecho, otros bosques, como los de coníferas de las latitudes nórdicas, están constituidos por una, o a lo sumo unas pocas especies de árboles. En el mismo bosque tropical encontramos también cientos de especies distintas de mariposas de muy similares hábitos alimentarios: suelen aspirar el néctar de las flores cuando adultas y comen vorazmente hojas verdes cuando larvas. ¿Por qué tantas? ¿Por qué tantas especies de animales?

La respuesta se puede buscar entre las consecuencias esperables de los principios termodinámicos y los más estrictamente evolutivos y de competencia biológica.

El comienzo de la evolución de las especies puede situarse en el primer momento en que los mecanismos de duplicación molecular fueron utilizados. Se pudieron copiar y distribuir grandes cantidades de información. (Copiar es muy importante, ya que resulta barato, como imprimir, y además en el proceso son inevitables e inevitados los errores, las mutaciones, que introducen variedad.) En vez de construir lentamente, una y otra vez, una organización diferente en cada localidad, se dio la posibilidad de colocar rápidamente, y a bajo coste, sistemas equivalentes ya preexistentes, es decir, individuos.

Cuando los organismos se dividen es fácil que, por la acción del azar, se produzcan dos partes no idénticas. La asimetría resultante tiende a acrecentarse cada vez que interaccionan. Es el principio de san Maleo —al que se dedica un capítulo más adelante—, por el que cuando interaccionan dos sistemas distintos se acentúan las diferencias. «Los ricos cada vez son más ricos y los pobres cada vez más pobres.» Así podrían haber surgido, de la división de una célula primitiva, o de la unión de varias —que partidarios hay de ambas hipótesis—, las primeras células vegetales, las primeras animales y las primeras descomponedoras adaptadas a utilizar diferentes niveles energéticos; y así, sus diferencias se habrían acrecentado con el transcurso del tiempo y de sus interacciones.

Desde el punto de vista evolutivo, la respuesta se basa en una idea sencilla: diferentes características físicas del medio requieren adaptaciones diferentes. Así se pueden explicar las paradojas del plancton, del bosque tropical o del prado: sobre un mismo hábitat, aparentemente uniforme, convive un enorme número de especies distintas. En todos estos casos hay diferencias notorias de contenido mineral, en humedad, en exposición solar, en pendiente, en factores bióticos, en cambios estacionales a lo largo del año. etc., que permiten entender una gran diversidad porque dan lugar a diferentes condiciones físico-químicas. El aislamiento de los organismos en diferentes hábitats y condiciones favorece la autoaceleración de la evolución en

especies. Las menores poblaciones que se generan ofrecen mayores posibilidades de deriva génica y diferenciación. De esta forma, cuando una estirpe entra en la vía de la especialización, con el consiguiente aislamiento de sus poblaciones de intercría, el número de especies puede crecer en proporción geométrica. Por si fuera poco, cuando se encuentran poblaciones diversas la selección natural favorece relativamente la coexistencia de los individuos que son más dispares, los que no compiten entre sí.

Podemos aceptar que por estos mecanismos se haya producido una gran diversidad, pero ¿hasta el punto de cien mil plantas vasculares distintas o tres millones de insectos diferentes? Resulta difícil creer en un mosaico tal de espacios vitales diferenciados. Hay que pensar en otra potente fuerza capaz de mantener las especies separadas y de generar otras nuevas: la actividad de los depredadores de los cazadores. En la relación presa/depredador, cada nuevo mecanismo defensivo da lugar a las condiciones evolutivas adecuadas para que se produzca un nuevo tipo de ataque. Recuérdesse que a cada nueva artimaña del Törn de los dibujos animados responde Jerry con otra. Además, cuando por selección natural surge un nuevo herbívoro, se crea inmediatamente una oportunidad para un nicho de carnívoro. La aparición de éste crea a su vez otra oportunidad para otro nicho en el siguiente nivel trófico, y así sucesivamente, con el límite impuesto por la paulatina pérdida energética en cada salto de la cadena alimentaria, que puede tener como máximo cinco o seis eslabones. Además, si se ejerce una fuerte depredación sobre una presa, los recursos que utilizaba quedan libres para otras presas, las cuales a su vez permiten otros depredadores, en una regulación o *feedback* de tipo positivo. El efecto no siempre es el mismo; puede variar si cambia la eficiencia de predación. Añádanse los parásitos, depredadores en términos energéticos, pero que invierten la relación de tamaño y aumentan enormemente el número de especies.

1.2. MÁS ESPECIES EN LOS TRÓPICOS QUE EN LOS POLOS

Vemos, pues, que continuamente están surgiendo nuevas especies. Pero no en todas las partes del planeta existe la misma diversidad. ¿Por qué unos lugares tienen más especies que otros, los trópicos más que las zonas templadas y polares (tabla 2), los continentes más que el mar, las tierras bajas más que las altas, las islas grandes más que las pequeñas...? Aunque no hay una única y simple explicación de los gradientes de diversidad en el planeta, podemos intuir la respuesta fijándonos en las diferentes condiciones físicas de los hábitats citados (fig. 5). Las áreas mayores (que se hallan en los trópicos) ofrecen las mayores posibilidades de aparición de especies. La antigüedad y estabilidad de las condiciones aumenta la diversidad, al reducir la tasa de extinción. También los accidentes suaves promueven la diversidad, como en el caso de la sequía estacional en algunos desiertos moderados o la lluvia en los trópicos. La presencia de vegetación variada y estructurada también aumenta la de la población animal que vive sobre ella. En este sentido, el balance energético e hídrico que restringe la forma de los árboles impone una pequeña diversidad en las latitudes altas, donde las condiciones son más rigurosas. A esas latitudes aumenta la probabilidad de accidentes catastróficos (recuérdense las glaciaciones), y con ella la probabilidad de extinción. Hay teorías que atribuyen las altas tasas de especiación de los trópicos al hecho de que las poblaciones tienden a ser sedentarias, cosa que favorece la diferenciación en subpoblaciones. Otras afirman que las bajas tasas de extinción de los trópicos son consecuencia de una competencia reducida —mayor disponibilidad de recursos o menor uso por especie—, y de la mayor heterogeneidad de ambientes. Por ello la competencia puede ser reducida a través de la especialización y de la limitación del tamaño de la población. Otras teorías ponen el acento en una menor competencia por la depredación. Y también hay algunas que se basan en la reducción de las tasas de extinción por la mayor constancia ambiental.

<i>Insec-</i>	<i>Escarabajos</i>		<i>Hormigas</i>		<i>Libélulas</i>	
	Labrador	169	Alaska	7	Neártica	59
	Massachusetts	2.000	Iowa	73	Neotropical	135

	Florida	4.000	Trinidad	134	
Moluscos	<i>Nudibranchios</i>		<i>Caracoles</i>		<i>Lamelibranchios</i>
	Latitudes árticas	10	Labrador	25	Terranova 30
	Latitudes templadas	90	Massachusetts	100	Cabo Hatteras 151)
	Latitudes tropicales	130	Florida	250	Sur de Florida 200
Vertebrados	<i>Peces costeros</i>		<i>Serpientes</i>		<i>Pájaros que anidan</i>
	Labrador	75	Canada	22	Groenlandia 56
	Massachusetts	225	EE.UU.	126	Nueva York 195
	Florida	650	Mexico	293	Colombia 1395
Plantas	<i>Fanerógamas</i>		<i>Helechos y musgos</i>		<i>Géneros endémicos de fanerógamas</i>
	Labrador	390	Tierra de Baffin	11	Zona templada del norte 127
	Massachusetts	1.650	Labrador	31	Zonas tropicales 465
	Florida	2.500	Massachusetts	70	Zona templada del sur 55

Tabla 2. Número de especies en distintas regiones geográficas, las cuales muestran un aumento general de la diversidad conforme decrece la latitud. (De KORMODY 1969).

Es decir, el número de formas distintas de vida en un lugar y momento determinados está condicionado por el balance entre la aparición de nuevas especies y la extinción de las ya existentes. Estas mismas normas rigen la diversidad humana, mucho mayor en las estables ciudades que en las inhóspitas zonas montañosas.

1.3. LIMITE

¿Cuál es el límite máximo de este número de especies, de esta diversidad? El límite vendrá determinado por las tasas relativas de aparición y extinción que se adapten a la realidad local, y dependerá del espacio, el tiempo y la energía disponibles. Además, una diversidad excesiva es incompatible con el mantenimiento de una organización dinámica. Como recuerda Margalef, la diversidad de organismos conservados en un museo no sería funcional en la naturaleza. Lo mismo ocurre en la sociedad humana, que requiere definidas relaciones numéricas entre las personas dedicadas a las diferentes profesiones, relaciones que, por cierto, varían con la historia —y si no. que se

lo preguntan a los jóvenes que han de decidir formarse en los empleos y ocupaciones de la sociedad del futuro.

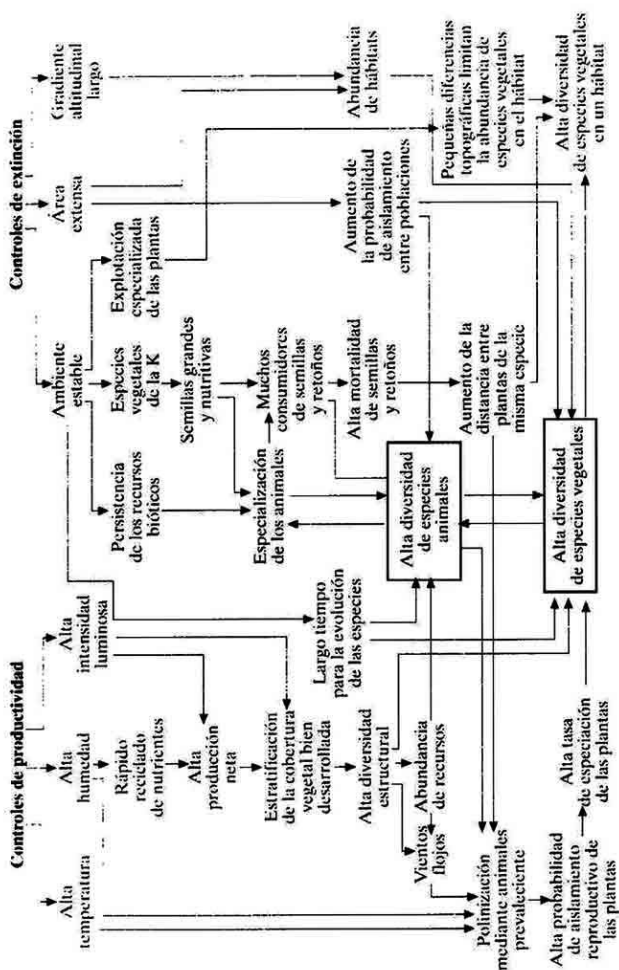


Fig. 5. Procesos productores de diversidad alta. (Modificado de PRICK 1975 y de COLINVAUX 1986).

Tanto en los componentes de un ecosistema como en los de cada uno de los grupos taxonómicos se presentan regularidades numéricas parecidas: pocas especies representadas por muchos individuos y muchas especies representadas por pocos individuos cada una. Una expresión sencilla de esta propiedad es la diversidad —en el sentido formal en que la aplicamos los ecólogos—, alta cuando las especies son muchas y sus respectivas abundancias no son muy diferentes, y baja si las especies son menos numerosas y algunas son poderosamente dominantes. En un campo de trigo existe una diversidad mucho más baja que en un arrecife de coral o en el bosque tropical.

Se puede establecer una analogía con la diversidad del lenguaje. La lengua popular suele ser rica en expresiones de uso repetido y diversidad total baja: es «caliente» (lenguaje de amor, por ejemplo). Y ello contrasta con el lenguaje más pulcro —y a menudo más pedante— de los eruditos, con tendencia a no repetir las palabras: es más «frío».

Al igual que ocurre en los lenguajes (argot, por ejemplo), un sistema ecológico de menor diversidad deja fluir más energía a través de él, se renueva más rápidamente y está sometido a mayores fluctuaciones.

La vida, por lo menos desde nuestra reducida capacidad de percepción sensorial, se mueve dentro de unas pocas dimensiones. La consideración del espacio, una de ellas, es pues importante. Cuando aumenta el espacio estudiado, la diversidad varía en función del ecosistema que se considere: por ejemplo, rápidamente deja de aumentar en el campo de trigo y casi no cesa nunca en la selva tropical. Es algo parecido a lo que ocurre entre el mosaico común y el romano o el modernista.

Se intuye fácilmente que un sistema con una total relación de todas las partes entre sí no es funcional ni se puede mantener. Es lo mismo que ocurriría con un sistema electrónico. Dentro del discurso ecologista se afirma a menudo que todo está relacionado y que no se puede tocar una parte sin que se resienta la totalidad. Esta afirmación, a pesar de su buena intención, es, en la mayoría de las ocasiones, falsa. Muchas de las posibles relaciones son débiles o no existen. La relación parcial es una fuente de jerarquía; todo el mundo sabe, y en especial

los militares, que cortar las relaciones interpersonales contribuye a crear las jerarquías, y no sólo en la sociedad humana, sino también en los sistemas nerviosos —donde las neuronas no están todas conectadas con todas— y en los ecosistemas.

Las relaciones pueden ser de diversos tipos. La más corriente es precisamente una de las que se han citado como generadoras de diversidad, la que existe entre el depredador y la presa, que desde Lotka y Volterra ha sido objeto de numerosas formulaciones y modelos matemáticos predictores de la evolución de las respectivas poblaciones, y que tiene un enorme interés aplicada en el estudio del efecto de la explotación humana.

La naturaleza ha invertido sus rendimientos en complicarse y ofrecernos sus maravillosas «obras de arte». La creciente influencia de una de estas obras, el «hombre», con su ocupación de la tierra para cultivos y otras finalidades (la explotación simplifica los ecosistemas), se está constituyendo en un factor de extinción y amenaza para las demás, para el «arte de la vida».

II. LA MATERIA Y LA ENERGÍA

A pesar de esta gran diversidad de los seres vivos, los principios de su funcionamiento y de sus actividades (reproducción, crecimiento, alimentación, respiración, excreción, percepción, movimiento...) son universales. Se adaptan a los distintos medios para aprovechar sus recursos materiales y energéticos en el espacio y a lo largo del tiempo.

2.1. LOS CICLOS DE LOS ELEMENTOS

La abundancia relativa de los distintos elementos en el cosmos es bastante diferente de la que se observa en los seres vivos. Si quemamos cualquier muestra viva —una hoja, un pollo o bacterias— se producen unas cenizas muy similares entre sí, pero bastante diferentes de la composición de la corteza terrestre o de una llamarada del Sol (tabla 3).

Composición de la Tierra (átomos ‰)

<i>Elementos orgánicos</i>				<i>Elementos minerales</i>									
				<i>Metaloides</i>				<i>Metales</i>					
	H	O	C	N	S	P	Si	Ca	Mg	K	Na	Al	Fe
Atmósfera	0	210	0,3	783	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hidrosfera	664	330	0,01	0	0,17	0	0	0,06	0,34-	0,06	2,8	0	0
Litosfera	29	604	1,6	0	0,4	0,8	205	18,8	17,7	13,7	25	62	19
Biosfera	498	249	249	2,7	0,17	0,3	0,33	0,73	0,31	0,46	0	0,16	0

Tabla 3. Composición elemental de los seres vivos comparada con la de la Tierra. (De DEEVEY 1970.)

La mayoría de los elementos son asimilados en disolución, aunque en los organismos terrestres tanto el carbono como el oxígeno entran, desde luego, a través del aire. Ocho elementos son los procesados en grandes cantidades, y en consecuencia sus ciclos han sido los más estudiados por los ecólogos. Se trata del carbono, el oxígeno, el nitrógeno, el fósforo, el azufre, el calcio, el sodio y el potasio.

Estos elementos, a los que se suele denominar de forma más o menos vaga como nutrientes, y a diferencia de la energía, se mantienen dentro de los ecosistemas, reciclándose continuamente entre los organismos vivos y el mundo inanimado, al compás de cómo van siendo asimilados y excretados. Cada elemento sigue su propio ciclo, pero todos son movidos por la energía solar. En la mayor parte de las comunidades, los intercambios de nutrientes entre los seres vivos y el ambiente físico están equilibrados. Hay, sin embargo, algunas en que no ocurre así, como cuando se forma carbón, o cuando el cultivo intenso por el hombre o la erosión se llevan los nutrientes del suelo.

Se puede dividir idealmente a los ecosistemas en compartimentos a través de los cuales circula la materia y dentro de los cuales ésta puede permanecer. La mayor parte del ciclo implica a tres compartimentos activos: los organismos vivos, el detritus orgánico muerto y los nutrientes minerales disponibles. Hay otros dos compartimentos menos activos, formados por los compuestos inorgánicos y los orgánicos disponibles sólo indirectamente (fig. 6).

En el paso del compartimento inorgánico al orgánico, la producción primaria de las plantas es el agente más importante en el ciclo del carbono, el oxígeno, el nitrógeno, el fósforo y el azufre. En el caso de los cationes, hay además asimilación directa por parte de los animales a través del agua.

La respiración devuelve parte del carbono y del oxígeno, tras pasar por uno o varios de los diferentes niveles de la red trófica. El calcio, el sodio y los otros iones minerales son excretados o lavados también rápidamente. La mayor parte del carbono y del nitrógeno asimilados se transfieren por muerte y excreción al compartimento de los detritus. De allí, una porción es devuelta al compartimento vivo a través de la alimentación de los detritívoros, pero la mayor parte pasa al compartimento mineral por lavado, descomposición y oxidación en el proceso de mineralización.

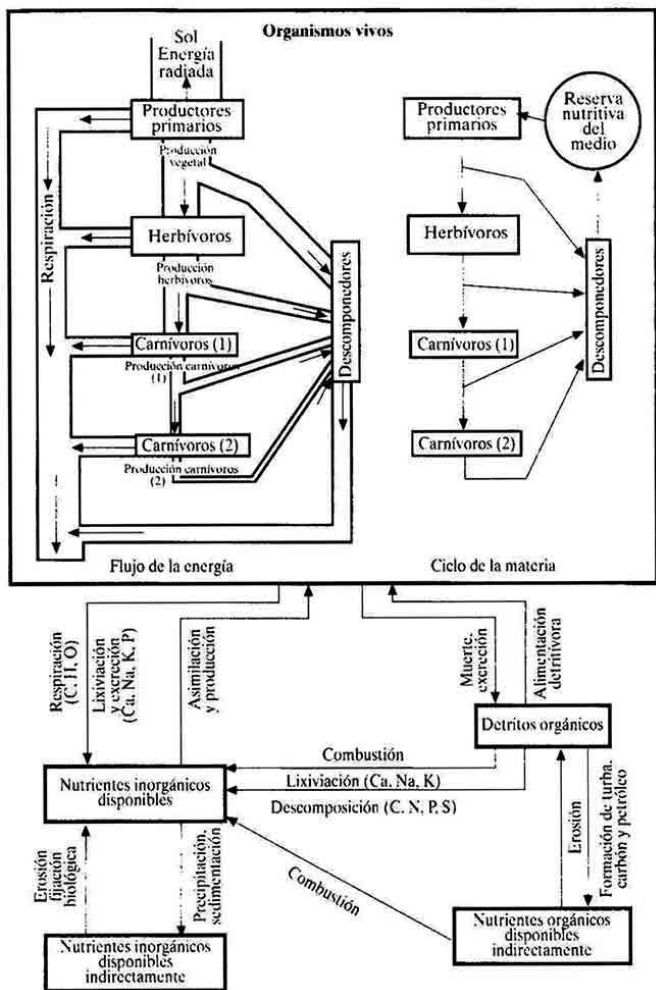


Fig. 6. Compartimentos por los que tiene lugar el ciclo de la materia. Cadenas tróficas.

El intercambio con el compartimento de los minerales no directamente disponibles de la atmósfera, las rocas carbonatadas, el carbón, etcétera, ocurre sólo con lentitud, principalmente por procesos geológicos.

El movimiento de los nutrientes va paralelo al flujo de energía a través de la comunidad. El carbono es el que está más ligado, porque sus compuestos contienen la mayor parte de la energía asimilada por la fotosíntesis. El nitrógeno, el fósforo y el azufre pasan más lentamente que la energía, porque son retenidos en el cuerpo para la síntesis de moléculas estructurales y funcionales. En cuanto al intercambio de cationes, en un ecosistema estable las pérdidas por el lavado superficial e intersticial se compensan por los aportes de la precipitación y la erosión.

El ciclo del agua es el paradigma de los ciclos de nutrientes, pues es aproximadamente compensado a escala global y movidos por la energía solar. La precipitación compensa la evaporación y la transpiración en el ciclo hídrico global —no a nivel regional, pues existen zonas donde no se da tal compensación por causa del transporte horizontal, como por ejemplo en los desiertos— (figura 7). La evaporación y la transpiración se podrían comparar con la fotosíntesis en el sentido de que requieren absorción de energía, y la precipitación vendría a ser como la respiración en el sentido de liberarla. La evaporación es lo que controla el flujo de agua en el ciclo hidrológico: cuando aumenta produce como resultado un incremento igual de la precipitación.

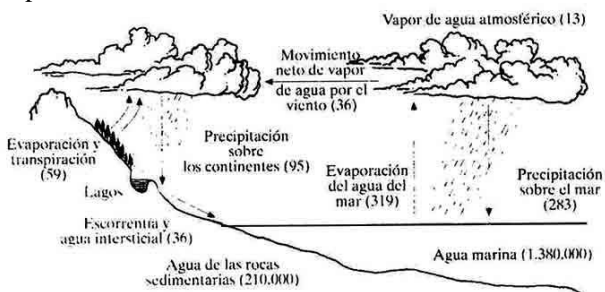


Fig. 7. Ciclo del agua. Los valores de almacenaje y de transferencia se expresan entre paréntesis como 10^{18} gramos y 10^{18} gramos por año respectivamente. (De RICKLEFS 1973).

Los elementos se hallan presentes en forma distinta según estén en la litosfera, la hidrosfera, la atmósfera o la biosfera. El ciclo del oxígeno es compensado por la fotosíntesis y la respiración (fig. 9). El ciclo del carbono (fig. 8) es complementario del anterior. El nitrógeno (fig. 10), el fósforo (fig. 11) y el azufre (figura 12) siguen ciclos más complejos, en los que intervienen microorganismos con capacidades metabólicas específicas. Los ciclos del carbono, el oxígeno y el nitrógeno muestran las características básicas de los ciclos minerales en el ecosistema, pero otros, particularmente los de fósforo, el potasio, el calcio, el sodio, el azufre, el magnesio y el hierro, también desempeñan un importante papel en el funcionamiento de los ecosistemas.

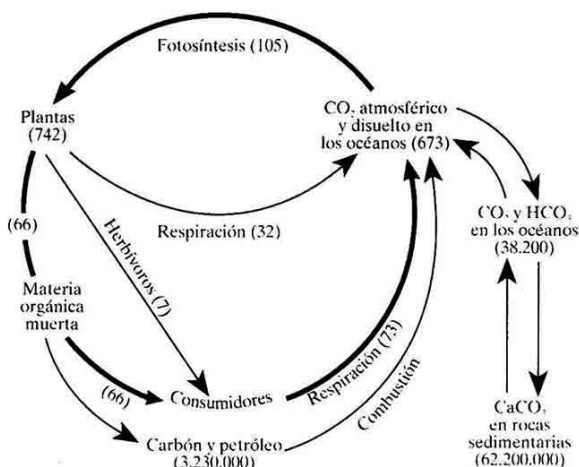


Fig. 8. Ciclo del carbono. Los valores de almacenaje y transferencia se dan en 10^{15} gramos. (De RICKLEFS 1973, basado en muchas fuentes).

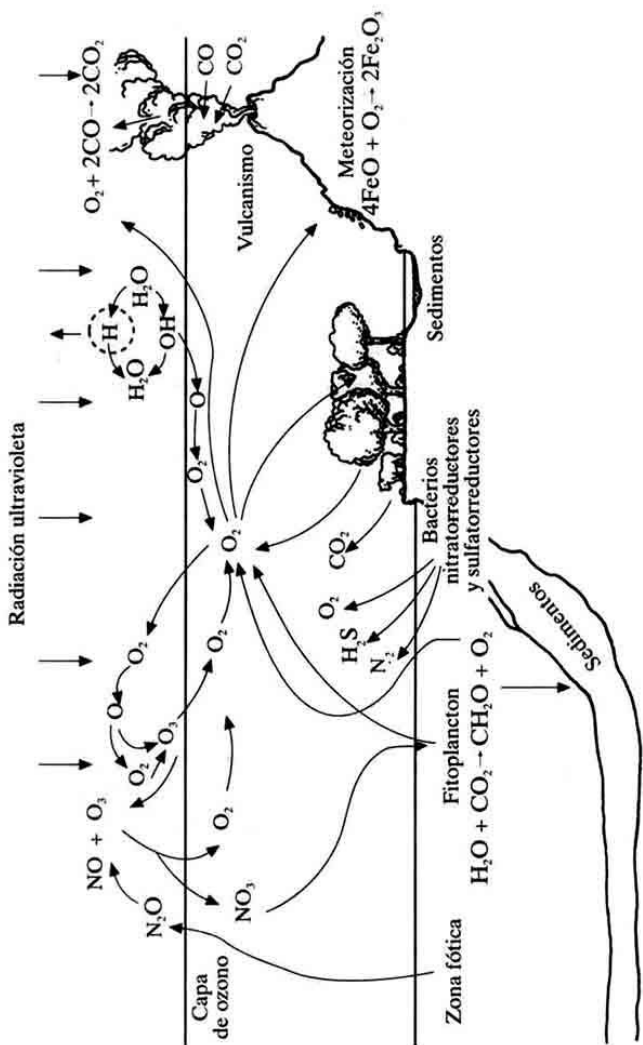


Fig. 9. Ciclo del oxígeno. Es importante recordar que el flujo de todos los procesos aquí ilustrados es pequeño comparado con el volumen de oxígeno presente en el aire. (Basado en CLOUD y GIBOR 1970).

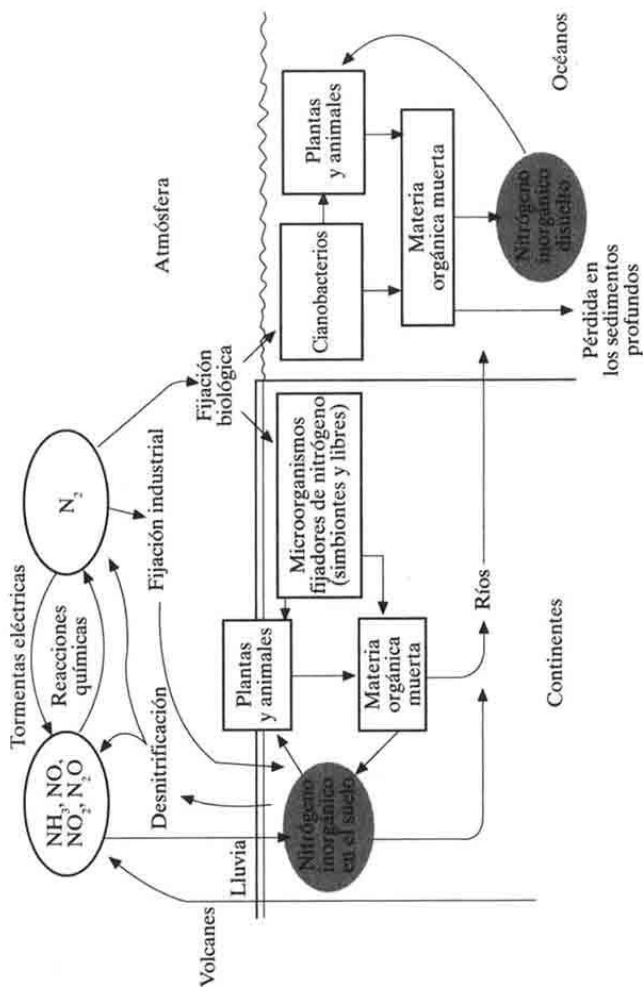


Fig. 10. Ciclo del nitrógeno. (De MORAN *et al.* 1980).

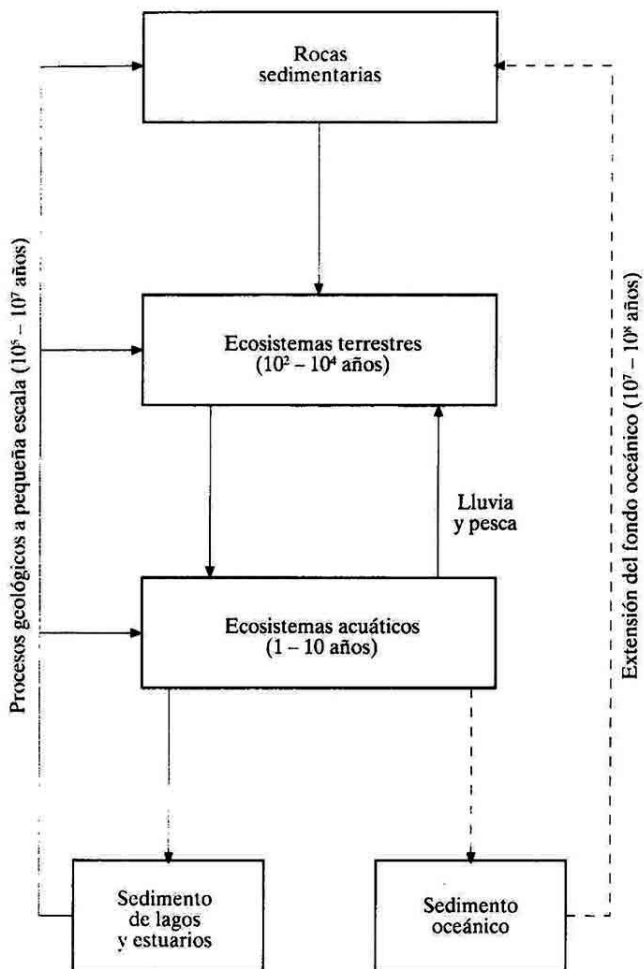


Fig. 11. Ciclo global del fósforo. La vuelta a la tierra desde el océano profundo es problemática. Los tiempos de residencia y transferencia son aproximados. (Basado en MORAN *et al.* 1980 y en COUNVAUX 1986).

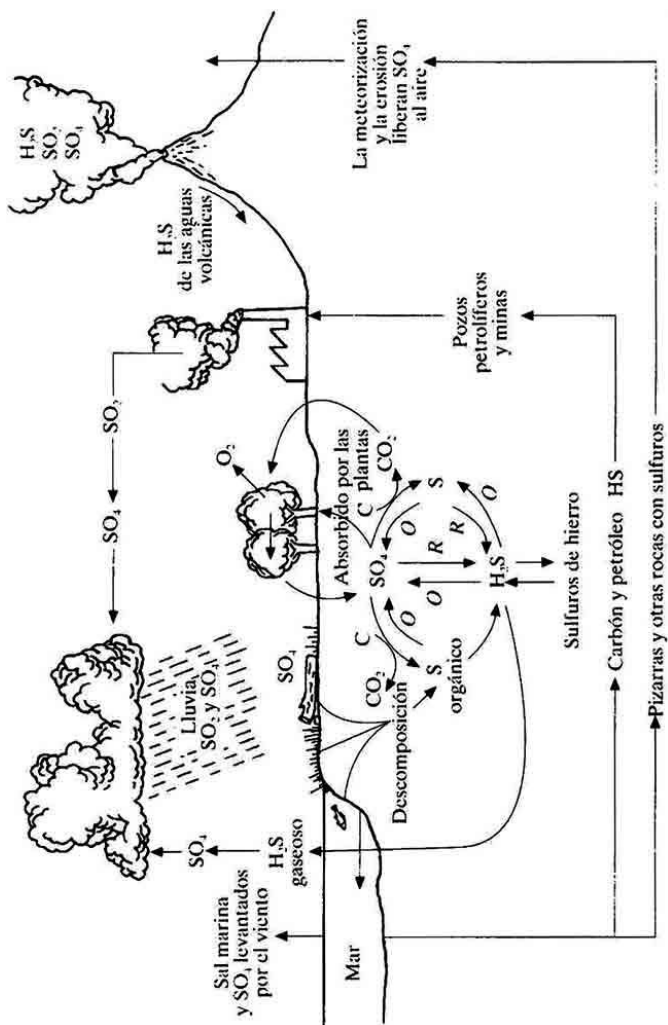


Fig. 12. Ciclo del azufre. R: La reducción del sulfato la llevan a cabo las bacterias sulfatorreductoras. O: La oxidación de los sulfuros y del azufre la llevan a cabo bacterias fotosintéticas y quimiosintéticas. (Basado en COLINVAUX 1986).

El movimiento del fósforo —uno de los más estudiados por su importancia en relación con componentes tan esenciales de la vida como los ácidos nucleicos, las membranas, los huesos, etc., y porque limita la producción vegetal especialmente en los medios acuáticos (cuando se halla en gran cantidad en ríos, lagos y embalses provoca la eutrofización o crecimiento exagerado de productores primarios, algas y plantas superiores)—va íntimamente ligado al oxígeno (cuando hay mucho se forman fosfatos) y a la acidez (con calcio forma compuestos insolubles). Su ciclo consta de pocos pasos —asimilación, excreción y mineralización— y tiene lugar en el suelo y el agua, sin entrar en la atmósfera.

Los ciclos son similares en la medida en que la descomposición llevada a cabo por los microorganismos devuelve los elementos a formas que pueden ser asimiladas por las plantas. La velocidad de flujo depende de la ecología de los organismos implicados. Los problemas medioambientales antroposféricos (eutrofización, falta de nutrientes, etcétera) pueden producirse por condiciones del entorno que inciden en un paso crítico de uno o más de estos ciclos. Los distintos pasos de los ciclos más importantes pueden ser apreciados con algo más de detalle en las figuras 6 a 12.

2.2. LAS REDES TRÓFICAS. EL FLUJO DE MATERIA Y ENERGÍA

Todos estamos familiarizados con los conceptos de cadena y de red trófica: de hecho ya se han utilizado en los capítulos anteriores.

Todo ecosistema puede reducirse a una superposición de dos ciclos, uno de materia y otro de energía (fig. 6). El primero es más o menos cerrado, pues determinados átomos son asimilados por determinados organismos que los metabolizan, y luego pueden pasar a formar parte de otros individuos cuando éstos consumen a los primeros. Más tarde o más temprano, pasan de nuevo a minerales o materia orgánica fuera de los organismos vivos. Es decir, parte del ciclo se desarrolla en el medio

vivo y parte en el inanimado. Se puede calcular el tiempo y fracción que cada elemento pasa en cada uno de los compartimentos, así como la intensidad del transporte con el uso de trazadores radiactivos o de isótopos diferenciabiles.

El flujo de materia va acompañado de otro de energía que es la condición para aquél y que tiene características distintas porque la energía se degrada y no es recuperable.

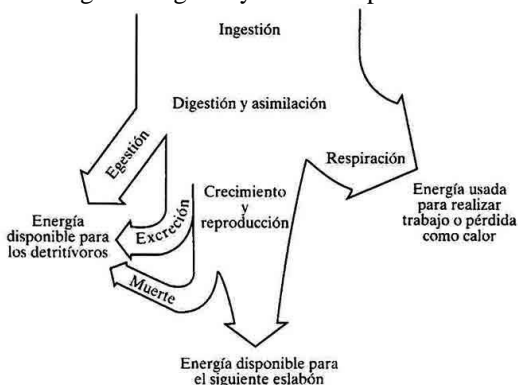


Fig. 13 Partición de la energía en cada eslabón de la cadena trófica.

Las redes tróficas constituyen una representación de las relaciones alimentarias del ecosistema, es decir, de los flujos de materia y energía. Esta entra en la red en forma de energía solar y fluye a través de los distintos niveles tróficos. Al pasar por cada uno de ellos sólo una parte se invierte en producción neta, crecimiento y reproducción (suele considerarse que es aproximadamente el 10%); la mayor parte se va en la respiración y en las cadenas tróficas laterales formadas por comensales (organismos que sacan provecho del huésped sin perjudicarlo ni beneficiarlo), simbioses y parásitos, que se suelen tratar como distintas a la depredación (fig. 13). Como la energía disponible va disminuyendo, el número de niveles posibles es limitado (no suelen superarse los cinco o seis en los casos más complejos, y si se exceptúa la cadena superpuesta de hiperparásitos). Por la misma razón, la explotación humana del ecosistema es más rentable en los niveles inferiores: la agricultura rinde más por

unidad de superficie captadora de energía (solar) que la ganaría.

La biomasa y la energía se distribuyen en forma de pirámide (fig. 14), grande en la base, ocupada por los vegetales, y cada vez menor en los distintos niveles, hasta el de los carnívoros superiores. La tasa de renovación disminuye de la base a la cima, de los vegetales a los carnívoros, que controlan mejor el flujo de energía.

Niveles tróficos

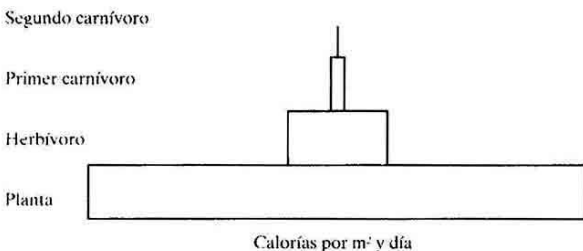


Fig. 14. Pirámide ecológica de la energía. Ilustra el concepto de degradación de energía en el paso de un nivel trófico a otro. Los animales consumen aproximadamente solo un 10% de lo que comen en crecer y reproducirse. El resto se disipa en forma de calor o es aprovechado por cadenas tróficas laterales. Por eso, en cada paso la producción se divide por 10.

2.2.1. El nicho

Cada organismo tiene un lugar y una función en la cadena, lo que se conoce como nicho. La selección adapta a los individuos a su nicho en cada generación, y no deja de actuar porque el medio ambiente cambia física y biológicamente de manera continua.

2.3. MATERIA-ENERGIA Y PRODUCCION

La vida es, pues, un flujo constante de materiales y una reconstrucción ininterrumpida de estructuras que requieren energía. El Sol la suministra, y es atrapada por medio de las moléculas de clorofila de las plantas. Sólo medio gramo de clorofila

por metro cuadrado de hoja bastaría para absorber prácticamente toda la luz incidente. De ésta sólo se aprovecha una parte muy pequeña (el uno por mil de la energía solar que llega a la superficie terrestre, fig. 15), pero aun así la vida tiene suficiente para cubrir el planeta. Ésta no tiende a trabajar mucho, sino a ocupar toda la Tierra con la mínima inversión energética posible: se trata de la ley del mínimo esfuerzo y la máxima ocupación.

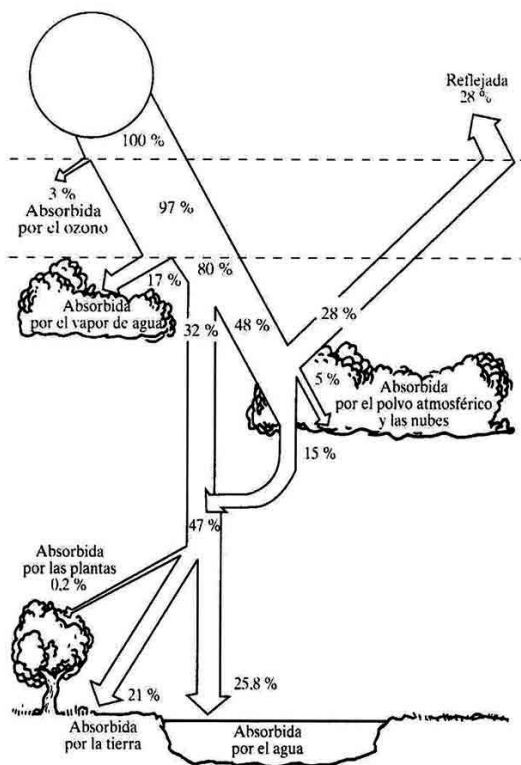


Fig. 15. Partición de la energía solar incidente sobre el planeta. Una fracción muy pequeña es usada por las plantas, pero más del 25% se consume para evaporar agua y causar la lluvia, incidiendo así también sobre la vida vegetal. (De MARGALEF 1985).

La energía no utilizada directamente en la producción, resulta efectiva para potenciarla a través del clima, la erosión, los movimientos oceánicos y el uso humano.

2.3.1. Producción primaria y factores limitantes

El 80% de la energía radiante del Sol traspasa la atmósfera y llega a la superficie terrestre en un espectro formado por diferentes longitudes de onda (fig. 16). Sólo la mitad de la extensión del espectro, esencialmente las ondas de luz visible, tienen fotones capaces de excitar a los electrones de la forma requerida para la fotosíntesis. La energía de estos fotones absorbidos puede transformarse en energía química, en forma de hidratos de carbono, con una eficiencia máxima del 35%, pero la eficiencia global de las plantas es mucho menor: en el laboratorio es del 20% bajo luz tenue y del 8% bajo luz brillante, y en el campo es aún menor, pues menos del 2% de la energía se convierte en materia orgánica (fig. 17).

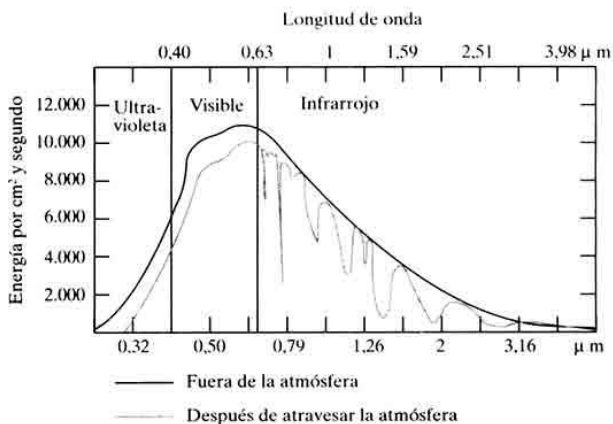


Fig. 16. Espectro de la radiación solar incidente sobre la atmósfera y sobre la superficie terrestre. La absorción selectiva llevada a cabo por los gases atmosféricos (particularmente CO_2 y H_2O) ofrece a las plantas un conjunto irregular de longitudes de onda. La fotosíntesis necesita energía de longitudes de onda comparables a las visibles, un estrecho rango en el que el flujo energético es mayor, con lo que incluye aproximadamente la mitad del flujo total de energía. (De LAMB 1972).

Esto se explica parcialmente como resultado de la pérdida de energía lumínica en el calentamiento del suelo o de las partes muertas o moribundas de la planta, o en la evaporación del agua. También puede ser que las plantas dispongan de grandes dispositivos de clorofila captadores de energía solar (fig. 18) para aprovechar toda la luz tenue disponible a primeras y últimas horas del día. La luz absorbida por estos pigmentos adicionales podría no encontrar suficientes centros activos de producción bajo luz intensa y por eso se perdería, disminuyendo la eficiencia global. Las plantas están adaptadas al uso de luz difusa y de relativamente baja intensidad, y su utilización y conversión de altas intensidades de luz direccional (mediodía) son mediocres. La explicación más plausible de la incapacidad de usar más de un quinto de la luz incidente es seguramente la escasez de materias primas necesarias para la síntesis de materia orgánica, los denominados elementos limitantes.

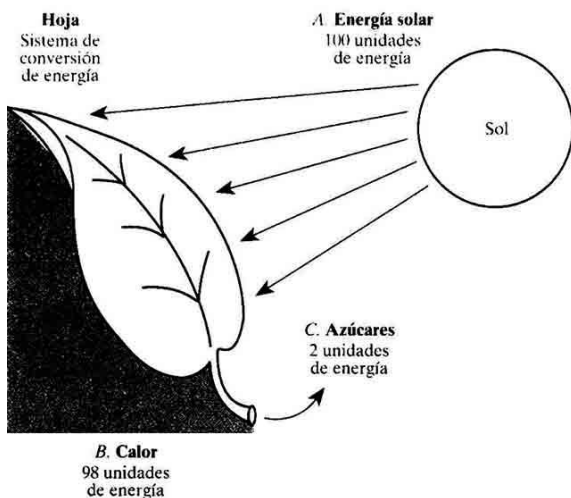


Fig. 17. En la conversión de la energía solar en azúcares se ilustran las dos leyes de la termodinámica: $A = B + C$ (primera), y C es siempre menor que A a causa de la disipación durante la conversión (segunda).

¿Qué materiales utilizan las plantas? El CO_2 que la atmósfera contiene en un 0,03%, el agua, y el nitrógeno y el fósforo,

entre otros compuestos del suelo. La velocidad de producción depende siempre del más escaso de esos elementos (fig. 18). Se trata del concepto, muy usado en ecología, de los factores limitantes, que muestra que las distribuciones son impuestas por las variables ambientales cercanas a los límites de tolerancia de una especie. Con frecuencia es el fósforo el elemento que desempeña este papel, dada su escasez, en parte porque queda a menudo inmovilizado en minerales insolubles. El nitrógeno puede serlo a veces, generalmente de modo temporal. Ello es así a pesar de su abundancia en la atmósfera (casi cuatro quintas partes), porque en forma gaseosa sólo los procariotas (bacterias y cianobacterias) lo pueden fijar y utilizar directamente (fig. 10).

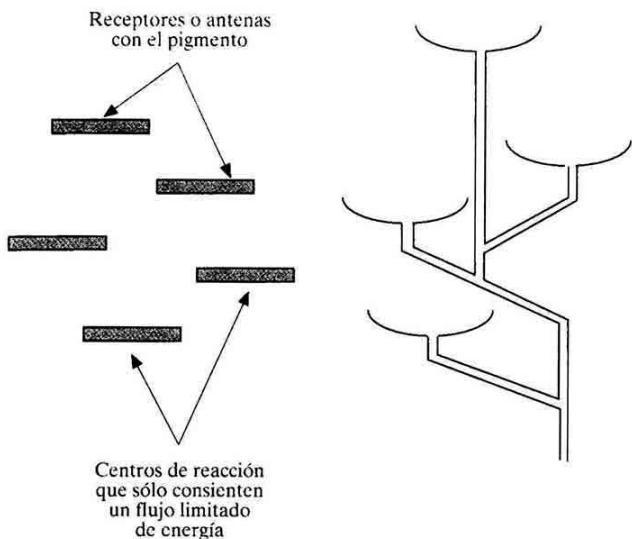
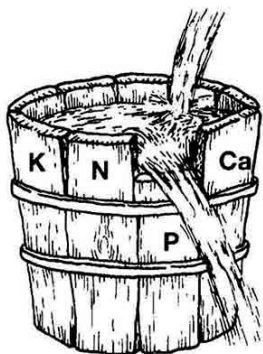


Fig. 18. (A) Limitación ciclo fotosíntesis por el número de centros de reacción y analogía hidráulica. (De MARGALEF1981).

(B) Dibujo de un tonel cuya capacidad viene determinada por el elemento limitante (la producción biológica viene determinada por el elemento más escaso, el elemento limitante). (Inspirado en un anuncio de fertilizantes de la Alemania del siglo XIX).



En tierra, la media de producción primaria (vegetal) es de unos 750 g de materia orgánica seca por metro cuadrado y año, y en los océanos aproximadamente una tercera parte de esa cifra (fig. 19). La causa principal de esta menor producción se halla en las frecuentemente inmensas distancias de circulación de los elementos —la profundidad media de los océanos es de 4 km—, lo que retarda mucho su retorno.

2.3.2. La asimilación del carbono, el esqueleto de la vida

La vida se sustenta sobre la fotosíntesis vegetal, proceso que aprovecha la energía solar para convertir el CO_2 y el agua en materia orgánica. La obtención de carbono constituye, pues, una necesidad fundamental para todas las plantas. Para resolverla, han ido adquiriendo una interesante variedad de mecanismos a lo largo de la evolución. Así han aparecido vías bioquímicas especializadas — C_3 y C_4 — en plantas de muy diferentes géneros, con enzimas y estructuras foliares especiales que las adaptan a mejorar o a mantener la absorción de CO_2 en condiciones de sequía y calor.

La síntesis orgánica sólo puede tener lugar tan rápidamente como se obtenga CO_2 . Veamos con un poco de detalle cómo lo obtienen diferentes plantas.

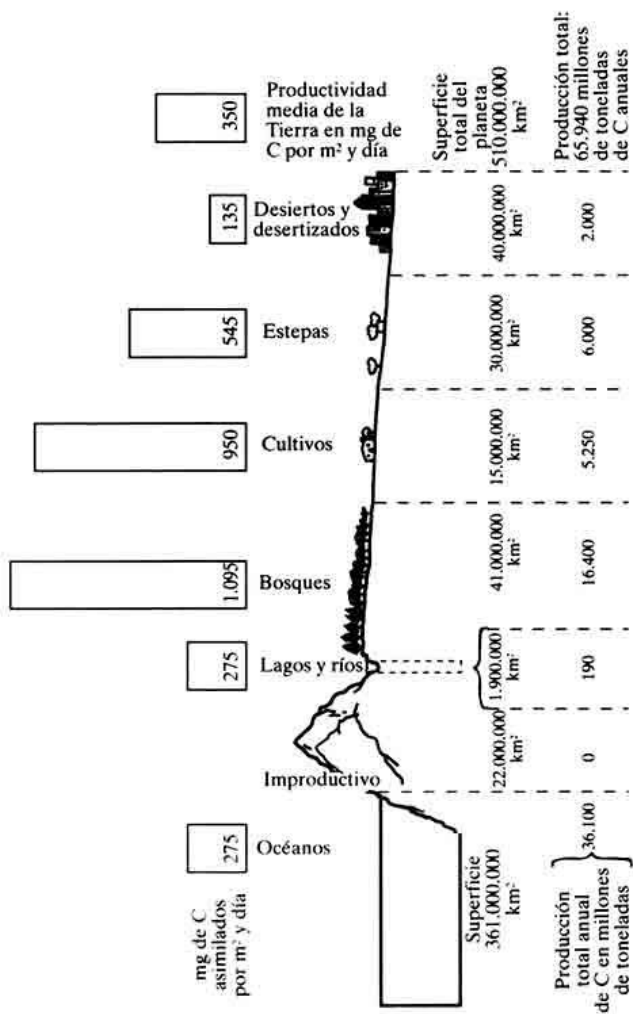


Fig. 19. Representación esquemática de los valores medios de producción mundial. Corresponde a valores entre la producción bruta y la neta; más cerca de la bruta en los océanos y de la neta en la vegetación terrestre. (De MARGALEF 1974).

2.3.2.1. En el aire. El mecanismo común

Las plantas terrestres toman el CO_2 atmosférico a través de los estomas, pequeños poros que sirven también como válvula de control hídrico. En el aire, el CO_2 , por su pequeña concentración (0,03%), es a menudo limitante para la fotosíntesis. De hecho, cuando se aumenta su concentración en atmósferas interiores, como las de los invernaderos, aumenta también la producción (PEÑUELAS y FIELD 1988). De ahí las ventajas de vías alternativas de obtención de CO_2 .

2.3.2.2. El CO_2 del suelo. Un interesante y particular ejemplo de adaptación

Las plantas terrestres hasta ahora estudiadas no asimilan más que insignificantes cantidades del CO_2 del suelo, donde es muy abundante como consecuencia de la actividad respiratoria y descomponedora de miles de millones de microorganismos. ¿No sería ventajoso suplementar el CO_2 atmosférico con el CO_2 edáfico obteniéndolo a través de las raíces? Esta es la estrategia que KEELEY *et al.* (1984) han hallado en una planta primitiva del grupo de los pteridofitos, la *Stylites andina*. Se trata de una planta de la región andina, próxima filogenéticamente a nuestros *Isoetes*, que crece sobre turba, es decir, sobre un suelo con una importante reserva de carbono. Sus partes aéreas se hallan cubiertas por una cutícula gruesa carente de estomas y esencialmente impermeables al CO_2 , por lo que la única vía de obtención plausible era la radicular. Suministraron CO_2 marcado radiactivamente a la planta y comprobaron que, en efecto, el carbono orgánico asimilado tenía ese origen.

Este descubrimiento abre nuevas perspectivas en el aspecto evolutivo de la colonización vegetal del medio terrestre. Cabe preguntarse si lo que motivó la pérdida de la capacidad de absorción de CO_2 por las raíces fue el desarrollo de los estomas asociado con una intensa circulación ascendente de agua, con el consiguiente acceso al CO_2 atmosférico. Asimismo, su interés, tanto desde el punto de vista fisiológico como del ecológico, mueve a ampliar la investigación sobre esta capacidad en otras plantas, especialmente en las que crecen sobre suelos turbosos o con abundante materia orgánica en descomposición.

2.3.2.3. *En el agua. El mecanismo inevitable*

Las plantas acuáticas, que han recolonizado el medio procedentes del terrestre, asimilan el CO_2 disuelto en el agua. Además, algunas han desarrollado, parece que de manera inevitable, la capacidad de utilizar el bicarbonato (PEÑUELAS 1984C), pues éste es la forma de carbono inorgánico más abundante en el agua. El carbono inorgánico se halla disuelto en el agua como una mezcla de CO_2 , bicarbonato y carbonato en equilibrio y con concentraciones relativas que dependen del pH. Como éste oscila en la mayoría de aguas naturales entre 7 y 8.5, el bicarbonato es la forma predominante, entre 4 y 140 veces más que el CO_2 , mientras que el carbonato representa casi siempre menos del 1% del total.

2.3.2.4. *La asimilación. Las vías especializadas*

Una vez obtenido el CO_2 , debe procederse a su asimilación. En los organismos vivos sólo existe un mecanismo primario de carboxilación por el cual todo el carbono orgánico deriva del CO_2 . Recibe el nombre, entre otros muchos, de ciclo de las pentosas, y se inicia con la acción de una enzima fundamental sobre el que se están realizando interesantes experimentos de ingeniería genética: la ribulosa difosfato carboxilasa. Algunas plantas, las denominadas C_4 y las llamadas CAM, han desarrollado, además, mecanismos auxiliares de fijación que tienen en común el favorecer el suministro de CO_2 a esta enzima: es como si mantuvieran una reserva interna —en ácidos— de carbónico a mayor tensión que la atmosférica.

El mecanismo fotosintético de las plantas C_4 funciona atrapando el CO_2 atmosférico en forma de ácidos de cuatro carbonos —y de ahí el nombre— que luego se descarboxilan transfiriendo CO_2 en alta concentración al ciclo de las pentosas. Estas plantas, con representantes en por lo menos dieciséis familias de angiospermas y entre las que se encuentran muchas de alto interés agrícola, como el maíz o la caña de azúcar, son especialmente eficientes a temperaturas altas en las que el CO_2 es limitante para las demás.

El mecanismo fotosintético de las plantas CAM (metabolismo ácido de las crasuláceas. plantas en las que fue descubierto) funciona de forma parecida. El CO_2 absorbido por los estomas es fijado durante la noche en un ácido de cuatro carbonos, el málico. Durante el día los estomas se cierran, el málico se descarboxila y el CO_2 resultante se transfiere al ciclo de las pentosas. Así se impide la enorme pérdida de agua que se produciría con los estomas abiertos en las zonas desérticas donde crecen estas plantas.

Pero volvamos al trabajo de KEELEY *et al.* (1984). porque en él hay otro hallazgo interesante: han puesto de manifiesto un metabolismo asimilatorio del tipo CAM en la *Stylites andina*, y si a ello añadimos que Keeley también encuentra este tipo de metabolismo en los *Isoetes*, queda en entredicho la hipótesis que sostenía la aparición nueva de este metabolismo para proteger a las crasuláceas de la pérdida de agua: quizá ya lo presentaban las primitivas plantas acuáticas que colonizaron la tierra, y los metabolismos CAM y C, no son sino estrategias reaparecidas a lo largo de la evolución.

La fotosíntesis, ese proceso básico que sostiene la vida, aún tiene muchos misterios por resolver.

2.3.3. La producción secundaria. Bajas eficiencias de transferencia

En las sucesivas transferencias entre los compartimentos del ecosistema, la energía circula en forma química, asociada a productos químicos endergónicos. Los organismos cuyos procesos de síntesis no dependen directamente de la energía solar sino de otros organismos, se denominan productores secundarios. En el curso de la evolución se han distinguido dos grupos: las bacterias y hongos, que promueven una gran degradación de energía con una biomasa relativamente pequeña, y otros que se han complicado y mantienen una biomasa grande y utilizan los compuestos proporcionados por los productores primarios. Aunque hay algunas excepciones (bacterias comedores y animales que absorben alimento líquido), se pueden caracterizar por el hecho de absorber —osmotróficos— y el de comer —

fagotróficos—. Estas estrategias, como ya hemos visto, permiten una gran diversificación.

Posiblemente una de las conclusiones más importantes del estudio energético de los ecosistemas es que, de mucho, la mayor parte de la producción primaria es degradada por los descomponedores y detritívoros más que por los herbívoros.

De los trabajos de LINDEMAN (1942) se extrajo la regla de la eficiencia del 10% en cada salto de la cadena trófica. En otros estudios sólo se ha hallado un 1%. En realidad, es muy probable que generalmente sean inferiores al 10%, lo que explica las formas de las pirámides tróficas halladas en el estudio de ecosistemas naturales (fig. 14). La eficiencia de producción se refiere a la de conversión de comida en producción neta, es decir, en sus propios cuerpos, carne producida/pienso consumido. Esta eficiencia varía ampliamente para los diferentes animales.

Los ecólogos calculan también el balance energético de poblaciones completas, y en sus estudios comprueban cómo se maximiza la producción neta y cómo disponen los animales su anatomía, su fisiología y su comportamiento para minimizar la renovación, es decir, alargar la vida. Así, en la mayoría de los casos, comprueban los alimentos que deben consumir y refuerzan la hipótesis de que los nichos animales permiten maximizar los flujos de energía. Puesto que el tamaño de las poblaciones de carnívoros depende de la eficiencia de producción de las presas, éstas tienen importancia más allá de la propia especie. Cada animal está, sin embargo, programado para obtener la energía tan eficientemente como esté disponible y no para privarse de energía a fin de que después otros puedan tomarla, para hacer el mejor uso posible en orden a sus propios propósitos y no para pasar energía a los demás: son máquinas eficientes para egoístas. Esta es una de las causas de que la eficiencia de transferencia de energía sea baja.

2.4. MATERIA-ENERGIA Y ADAPTACION

La ecofisiología es la rama de la ecología dedicada al estudio de la adaptación de plantas y animales a la realidad física. Acercarnos a algunos de sus postulados nos permitirá comprender las formas de las plantas y las de los animales, así como diversas cuestiones sobre su distribución.

2.4.1. El diseño de las plantas en función de la irradiancia y del CO₂

El diseño físico de las plantas más familiares puede considerarse como el resultado de la baja eficiencia de la fotosíntesis a luz intensa y de la pequeña concentración de CO₂ atmosférico. Las formas de las hojas y de las plantas parecen seguir diseños que difunden la luz de tal manera que el máximo número posible de hojas reciba la intensidad óptima para la fotosíntesis. Los árboles adaptados a luz brillante tienen hojas dispersas en profundidad, dispuestas en muchas capas, para difundir radiación de intensidad óptima para la fotosíntesis a tanto tejido fotosintético como sea posible. Los árboles de sombra suelen disponerse formando pocas capas de hojas o incluso una sola, para absorber toda la luz a la primera intercepción. También las hojas erectas de las hierbas trabajan como receptores en un plano inclinado, otro dispositivo para aumentar el área foliar sometida a intensidad lumínica óptima.

En los ecosistemas acuáticos, a diferencia de los terrestres, la fotosíntesis es limitada más a menudo por la luz que por el suministro de carbono, y por ello las plantas acuáticas disponen de adaptaciones a la tenue luz de su hábitat, como puede ser la optimización de su sistema pigmentario captador.

Así pues, en los continentes la energía radiante es abundante y la materia prima, el CO₂, escasa. Debido a esta desproporción, la eficiencia de captación de la energía es baja, y es a causa de ello que las plantas pueden reflejar fuertemente en el verde. Por la misma razón, los árboles de los bosques tienen hojas pequeñas en lugar de grandes y las plantas de las praderas tienen hojas lanceoladas estrechas. No sólo el color y la forma del paisaje, sino también la abundancia de vida animal resultan del suministro peculiar de luz y CO₂ en la superficie terrestre.

Pequeñas variaciones en estos dos factores producirían cambios importantes de las formas de vida.

2.4.2. Balances calóricos e hídricos y forma de las plantas. ¿Por qué no hay árboles en la tundra ártica?

Cada especie está adaptada a las condiciones de su nicho. Entre éstas, la temperatura y el suministro de agua son de las más importantes —junto con la luz y el CO_2 , en el caso de los vegetales—, de forma que cualquier clase de planta o animal se halla restringida al hábitat donde la temperatura y el suministro de agua —el agua sólida no cuenta como tal— posibilitan el equilibrio de su balance energético. Esto nos lleva a comprender la distribución de las grandes formaciones vegetales. Así se entiende el predominio de coníferas en los bosques boreales, de árboles caducifolios en las latitudes medias y de formas especiales de vida en los desiertos y en la tundra.

Del interés que tiene este tema da fe el que algunos autores sitúen el inicio de la ecología moderna en 1855. Por aquel entonces. Alphonse de Candolle, encargado de las colecciones del Museo de París, se convirtió en el último científico que intentó describir todas las especies de plantas conocidas por la ciencia, intento en el que los papeles colapsaron la mesa de su despacho. El estudio de las diversas plantas le sugirió la hipótesis, después probada a grandes rasgos, de que las formas de las plantas venían impuestas por el clima y sus parámetros más fácilmente medibles, la temperatura y la humedad.

Todas las plantas son «poiquilotermas». No regulan activamente la temperatura con energía interna, metabólica, como lo hacemos nosotros, animales endotermos u homeotermos —de «sangre caliente», como nos enseñaron en la escuela—. Sin embargo, la selección natural ha acabado por diseñar formas vegetales que sí introducen cierta regulación, aunque sea más pasiva, de la temperatura y la economía hídrica. La pérdida de agua es un problema mucho mayor para las plantas terrestres que para los animales, porque pierden mucha más en el intercambio gaseoso. Las razones son sencillas: los animales, para respirar, requieren oxígeno, que constituye el 21% del aire,

mientras que las plantas, para llevar a cabo la fotosíntesis, absorben CO_2 que constituye sólo el 0,03% del aire. Para obtener igual volumen de CO_2 que los animales de O_2 , deben exponerse a un volumen de aire casi setecientas veces mayor, y por tanto se enfrentan a otras tantas posibilidades más de ceder vapor de agua a la atmósfera. Y lo que es más importante, las plantas necesitan perder agua porque es el vehículo de los nutrientes del suelo. ¡Por eso las plantas tienen raíces! Así pueden tener un suministro continuado de agua con nutrientes en disolución. Al absorber la luz para la fotosíntesis, las hojas pueden calentarse rápidamente, y por lo tanto, según muchos fisiólogos vegetales, deben ser refrigeradas. Otros opinan que no existe tal necesidad, que no llegarían a quemarse. El mecanismo de refrigeración, al igual que en el *Homo sapiens*, se basa en la evaporación de agua, que se convierte así en un elemento limitante de tal importancia que determina la distribución de las plantas. En la mayoría de los casos, las isoyeras (líneas de un mapa que unen lugares de igual precipitación) marcan los límites de esa distribución.

El diseño de los árboles y de sus hojas varía desde el ecuador hacia los polos en función de los cambios de temperatura y humedad (fig. 20). En los bosques tropicales, aprovechando la abundancia de agua, las hojas son refrigeradas por evaporación, con lo que se mantienen dentro de un margen de unos pocos grados alrededor de la temperatura bioquímicamente óptima. Sus hojas son anchas y perduran durante todo el año. Y además, si hay saturación de humedad, no pierden suficiente agua y necesitan mecanismos especiales, goteros o goteadores en la punta de las hojas. Su forma no viene determinada por el balance calórico e hídrico sino por la optimización de la absorción de CO_2 y luz, los otros dos grandes factores determinantes del diseño de los vegetales.

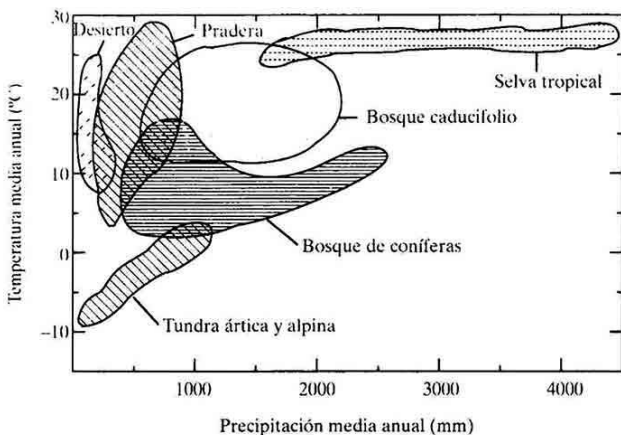


Fig. 20. Distribución de las seis grandes formaciones vegetales en términos de media anual de la temperatura y de la precipitación. (De la National Science Foundation, EE UU., en ODUM 1983).

Más al norte, en los desiertos, no se puede usar el agua para la refrigeración, por lo que las plantas deben estar diseñadas para minimizar la absorción de calor y la pérdida de agua. Tal es el caso de los cactus y otras plantas con pelos y espinas para protegerse de la radiación directa y atrapar una capa de aire húmedo, con gruesas cutículas impermeables al agua, con pocos estomas —además escondidos y cerrados— y con un metabolismo especializado. C_4 o CAM, que les permite conservar el agua porque reduce el tiempo de absorción del CO_2 o porque lleva a cabo el intercambio gaseoso durante la noche, cuando la temperatura es más baja y el estrés hídrico menor. Pero además de limitar la pérdida de agua, deben librarse del exceso de calor: así, entre otras adaptaciones, son verticales, para ofrecer la mínima área posible al sol del mediodía y la máxima al sol oblicuo de la mañana o de la tarde. En síntesis, estas plantas presentan hojas reducidas y poco horizontales y tallos verdes y fotosintéticos, que bastan. Y además, crecen poco, que es lo que necesariamente acompaña a un pequeño cambio de agua. Existen cactus centenarios y no enormes.

Más al norte, en zonas menos áridas, como la mediterránea, encontramos coníferas, árboles de hojas aciculares —en forma de aguja—, con muy diferentes propiedades convectivas con respecto a los de hojas planas, pues hacen posible un flujo del aire casi laminar. Como resultado, la temperatura foliar sigue casi paralela a la del aire circundante. De este modo pueden ser refrigerados por convección en los ambientes semidesérticos, donde, en efecto, crecen muchos pinos. La elevada pérdida del calor por convección reduce la demanda de agua transpirada para la refrigeración. Algunos ecólogos no ven en la refrigeración una explicación suficiente del gasto hídrico: consideran, y en gran parte tienen razón, que el transporte hídrico tiene como principal finalidad el aporte de nutrientes, no la refrigeración.

Por la misma razón, aunque con efecto contrario, estas hojas en forma de aguja son más fácilmente calentadas por convección del aire más cálido cercano al suelo en las noches frías y sin nubes, cuando si no fuera así se enfriarían por radiación al espacio, cuerpo negro frío. Probablemente, ésta es la razón de que se presenten también en los bosques nórdicos. Seguramente las coníferas deben de pagar un coste elevado en su eficiencia fotosintética, pues las hojas planas constituyen la norma cuando no hay restricciones de agua o de temperatura.

Con las coníferas hemos saltado las latitudes medias, donde los veranos son cálidos y húmedos, como en los trópicos, y les corresponden los árboles con hojas planas. Pero en invierno, las condiciones devienen más parecidas a las del Ártico y les corresponde la desaparición, como en la tundra: y de hecho, ésa es la respuesta, pues los árboles cierran totalmente la producción con la caída de las hojas. Estamos ante los bosques caducifolios.

Si nos trasladamos aún más al norte, entramos en el reino de la tundra. En esas tierras árticas, y también en nuestras montañas por encima de cierta línea, los árboles desaparecen. No es razón suficiente que el clima sea demasiado frío, porque hay plantas y arbustos que viven allí. También ha una ligera correlación con la distribución del suelo permanentemente helado, el permafrost, que deja una capa deshelada encima que puede ser excesivamente fina para servir de matriz a las raíces, pero

la sincronía no es perfecta. De ahí el interés de completar las explicaciones de su ausencia con otra más plausible, ligada al balance energético. Las plantas deben estar diseñadas para aumentar la temperatura y hacerla lo más próxima posible al óptimo bioquímico. Los árboles están en desventaja para lograrlo en esos lugares porque se elevan en el aire, frío y en movimiento, mientras que las plantas que apenas «levantan cabeza», además de presentar menores costes de mantenimiento y transporte por su menor tamaño, viven en una estrecha capa de aire calentada por la radiación del suelo. Esta es la principal explicación de que no haya árboles en las tierras árticas. Es más compleja la respuesta para el caso de la línea de los árboles en las montañas, donde también tienen importancia factores artificiales, como el pastoreo. La base de la resistencia al frío está en la habilidad de las acículas de retener agua cuando el suelo está tan helado que no hay aporte de la misma, lo que mueve a otras consideraciones tales como la duración de la temporada de crecimiento. Las hojas bien formadas, con cutículas gruesas, retienen bien el agua y sobreviven a largos períodos de helada. La estación de crecimiento en el Ártico y en las zonas alpinas es corta, lo que constriñe las posibilidades de formación de estructuras antes del siguiente invierno. En ese corto verano son las plantas pequeñas las que producen más y forman hojas más capaces de resistir la sequía fisiológica —agua sólida— del frío invierno.

Estas respuestas a las diversas condiciones de radiación. CO₂, humedad y temperatura se manifiestan incluso en un mismo árbol. Las hojas expuestas a plena luz se diferencian de las de sombra en que están mucho más divididas.

Dentro de los grandes biomas, la distribución y producción local de las plantas está determinada principalmente por la topografía y los suelos. La elevación, la pendiente, la exposición y la roca madre varían mucho en las regiones montañosas. El factor que ejerce la mayor influencia es la humedad, y puede coincidir con la distribución de nutrientes disponibles, pues las variables no cambian independientemente unas de otras.

2.4.2.1. Los colectores solares verdes

En este sentido, es de destacar una iniciativa del Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentària de Cabrils destinada a aprovechar las vertientes de nuestras montañas encaradas al sur para el cultivo intensivo durante el invierno, cuando las pendientes reciben mayor radiación solar que las superficies planas, en lo que vendría a ser un símil de las placas solares. Los experimentos hasta ahora realizados muestran importantes incrementos de producción, como por otra parte ya sabían los agricultores desde tiempo inmemorial.

2.4.3. Balances calóricos y forma de los animales. ¿Por qué no hay lagartos en el Ártico?

Las restricciones energéticas también están detrás de la distribución de los animales. En este sentido, son muy interesantes las estrategias alternativas usadas por los diferentes grupos animales para regular la temperatura.

Sería mejor denominar ectotermos a los poiquilotermos —o «de sangre fría»—, como los reptiles o los peces, que cuando están activos llegan a regular la temperatura dentro de un margen de cinco grados centígrados, pero usando las fuentes de calor externo para llevarlo a cabo. Así pueden conservar la energía metabólica y soportar largos períodos sin alimentarse, lo que les confiere unas magníficas propiedades de depredadores al acecho. Los episodios de gran actividad deben ser cortos, pues su metabolismo produce rápidamente déficit de oxígeno en sus músculos. Dentro de los ectotermos, pues, puede darse cierta regulación: por ejemplo, los tiburones depredadores son capaces de elevar su temperatura muscular para hacer viable una mayor actividad que la que podrían realizar a la temperatura del agua circundante, en lo que constituye una original adaptación para un ectotermo. Por otra parte, es inevitable que así suceda, como en todo animal corpulento. (véase 2.4.4).

Por la misma razón es también más adecuado llamar endotermos a los animales homeotermos —de «sangre caliente»—, porque regulan la temperatura usando calor metabólico. Tienen la desventaja de sus pesados costes energéticos, pero a cambio

son capaces de permanecer activos por la noche y en los lugares fríos, y pueden mantener altas tasas de actividad durante prolongados períodos de tiempo, capturando presas ectotérmicas o escapando de depredadores ectotérmicos. También pueden migrar largas distancias en busca de recursos negados a los ectotermos.

Los insectos tienen lo mejor de ambos sistemas. Son ectotermos, con las ventajas que ello reporta de conservación de energía y habilidad de supervivencia durante largos períodos sin alimento, pero al mismo tiempo son capaces de llevar a cabo esfuerzos y ejercicios prolongados como los endotermos. Evitan los déficit de oxígeno que se producen en los músculos de los ectotermos, como por ejemplo los reptiles, porque canalizan el aire directamente a los músculos por medio de su sistema traqueal, en lugar de conducirlo disuelto en la sangre. Como resultado, pueden migrar grandes distancias, comparables a las de los endotermos. Su admirable sistema, sin embargo, limita el tamaño a una masa a la que se pueda suministrar aire bombeado a través de los túbulos traqueales cuyo diámetro alcanza sólo unas mieras.

En los animales grandes, la endotermia posibilita el rápido movimiento del oxígeno disuelto en la sangre, y con ello el mantenimiento de la actividad casi independientemente de la radiación solar. El coste es elevado, pero pueden colonizar nichos prohibidos a los grandes ectotermos. Estos, por su parte, pueden actuar intermitentemente y dejar gran descendencia, ocupando nichos negados a los endotermos, y pueden ser más pequeños y por lo tanto también más numerosos. El diseño más eficiente de ectotermia es el de los insectos. Así, la mayoría de los animales terrestres pequeños son artrópodos ectotermos con sistema traqueal. La siguiente clase de tamaño es ocupada, a grandes rasgos, por los vertebrados ectotermos, anfibios, peces y reptiles. A medida que aumenta el tamaño de los animales aumentan en importancia los homeotermos, aves y mamíferos.

Dentro de los balances energéticos de los animales, a lo largo de la evolución se han seleccionado los mecanismos, formas comportamientos que mejor adaptan —energéticamente—

los organismos al medio en que desarrollan su actividad. Así lo ilustran los dos ejemplos siguientes.

2.4.3.1. La contracorriente al servicio del balance energético

Un mecanismo muy común o interesante para dirigir o impedir las pérdidas de calor —y también para modificar las concentraciones de agua— es el uso de sistemas de contracorriente —tan potentes que su aplicación en tecnología humana permitiría destilar el agua marina—. Las ballenas y las marsopas reducen así las pérdidas de temperatura de sus extremidades (fig. 21), y los mamíferos del desierto, las pérdidas de agua.

2.4.3.2. El coste energético del movimiento

Aparte de por su mantenimiento, el mayor coste del balance energético de un animal viene determinado por el movimiento. Nadar y volar consume menos energía que correr —usando una medida de efectividad como puede ser el número de kilómetros recorridos por unidad de «combustible»—. No parece lógico, pues se debe consumir energía para mantenerse en vuelo o moverse en un líquido medio mucho más viscoso. La respuesta está en la extensión de los músculos y de las extremidades y en la absorción de los cambios en el momento angular. Al volar, la mayor velocidad disminuye el costo, al igual que el ciclismo es más eficiente que la carrera pedestre. Los animales nadadores que presentan líneas hidrodinámicas reducen la flexión muscular y el momento angular, y primordialmente deben superar la fricción, que es en lo que más gastan. Cuando el hombre o el pato nadan son realmente ineficientes, pues su evolución no se ha orientado a superar los mencionados factores negativos.

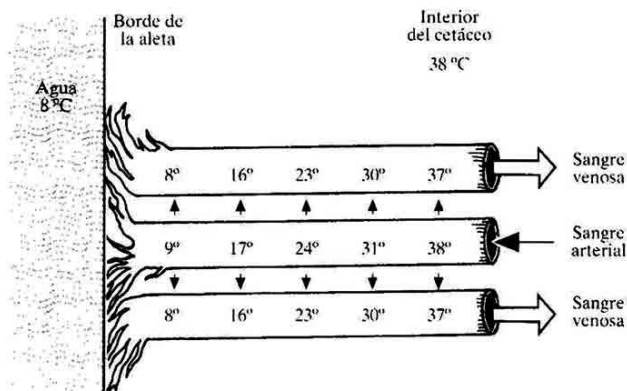


Fig. 21. Flujo de contracorriente como intercambiador de calor. En las aletas de las marsopas, cada arteria que va hacia la piel está envuelta por venas que transportan sangre a menor temperatura procedente de las partes externas, con lo que la sangre arterial se va enfriando, mientras que la venosa se calienta a medida que penetra. El cambio de temperatura es de 1°C. El resultado es que hay muy poca pérdida de calor desde las aletas a pesar de carecer de aislamiento térmico en su fina sección. (De COLIN-VAUX 1986).

Los diferentes métodos de locomoción terrestre, correr o saltar, son difíciles de comparar energéticamente: en realidad, han sido determinados por diferentes historias evolutivas.

2.4.4. Implicaciones del tamaño de los animales

La forma y tamaño de los organismos no sólo se pueden considerar como resultado de la adaptación a las restricciones materiales y energéticas del medio; también pueden ser considerados como causa de importantísimas implicaciones en las características de los seres vivos.

Vivimos, como continuamente se nos recuerda, en un mundo de cambios. Un nuevo hallazgo, una nueva idea, pueden revolucionar la ciencia. Así ha ocurrido con el microscopio, la teoría de la evolución, el código genético, la tectónica de placas o los ordenadores. Sin embargo, existen también descubri-

mientos importantes que aparecen lentamente, tanto, que pueden pasar inadvertidos. El de la relación entre las diferentes características de los organismos vivos y su tamaño es uno de ellos.

2.4.4.1. *Relaciones no lineales*

El tamaño del cuerpo —variable de muy sencilla medida— es un factor trascendental en la vida de los animales. De ello hay un soporte experimental considerable, consistente en las relaciones estadísticas entre este parámetro y numerosísimas características y propiedades de los seres vivos. Estas relaciones son generalmente alométricas, es decir, no lineales, de la forma $C = aM^b$, expresión en la que C es la característica que se relaciona, a es una constante. M es la masa, el tamaño del cuerpo, y el exponente b es otra constante, ordinariamente distinta de la unidad (cuando es igual a uno la relación es lineal). Ya Galileo Galilei se apercibió de alguna de estas relaciones y por ello afirmaba que los incrementos en el tamaño de los huesos habían de ser superiores, relativamente, a los del cuerpo. Por esta razón, las hormigas gigantes de la ficción cinematográfica no son factibles, pues sus patas se quebrarían bajo el enorme peso del cuerpo. Deberían tener unas patas mucho más gruesas, como ocurre con los elefantes.

Las relaciones más conocidas se establecen con las tasas metabólicas, pero las hay también con otros muchos caracteres. Algunos aumentan alométricamente con el tamaño (en la mayoría de los casos, no tanto como les correspondería linealmente; el exponente b es menor que 1). Tal es el caso de la duración de la vida, la respiración, la producción de leche, la duración de la inmersión en los mamíferos, las velocidades de locomoción, natación y vuelo, la ingestión de alimentos, etcétera. Otros disminuyen, también alométricamente (exponente b menor que 0): la tasa de crecimiento, la reproducción, la abundancia de animales en un área determinada, las horas de sueño (mientras un ratón duerme 14 o 15 horas, un elefante, una vaca o un caballo sólo duermen tres o cuatro), etcétera.

Los estudiosos del tema gustan de recordar un error clásico de alometría en *Los viajes de Gulliver*, al calcular, los liliputienses, la comida necesaria para el gigante basándose en un crecimiento lineal de las necesidades metabólicas, cuando en realidad tal crecimiento es alométrico. Por esta misma razón, el pequeño Pulgarcito de nuestros cuentos debía de sentir relativamente más frío que sus mayores. También mencionan a menudo (GOULD 1980) que mientras en nuestro desarrollo la relación alométrica entre la masa de la cabeza y la del cuerpo es negativa ($b < 1$), es decir, la proporción entre la cabeza y el cuerpo disminuye a medida que crecemos, en los personajes de ficción o en los productos comerciales ocurre lo contrario: la alometría es positiva. Así se puede apreciar en la evolución seguida por Mickey Mouse durante los últimos cincuenta años, en los que su cabeza ha aumentado relativamente más que su cuerpo, confiriéndole características infantiles, más agradables para el público y que van parejas con un mejor comportamiento del personaje.

Ante estas relaciones, un tanto sorprendentes para quienes a ellas se acercan por primera vez, surge uno de los puntos más criticables de su establecimiento: el sacrificio que se hace de la precisión, si bien se gana en generalización. Esto no es sino la constatación de que las descripciones estadísticas son siempre menos precisas y más generales que los datos individuales.

Una de las características más sorprendentes de la alometría es que diferentes procesos responden paralelamente a las variaciones del tamaño del cuerpo. Este paralelismo es conocido como principio de similaridad. En la mayor parte de las ocasiones, las relaciones de las tasas metabólicas pueden ser descritas con una fórmula potencial en la que el exponente del tamaño (M) es aproximadamente $3/4$.

Existen diversas explicaciones de estas relaciones, pero hasta ahora ninguna suficientemente convincente como para arrinconar a las demás. La ley de superficie es una de las más antiguas. Si la tasa de cualquier proceso asociado con M (L^3) depende de la superficie (L^2), entonces la tasa debe variar como $v^{2/3}$ y suponiendo densidad constante, como $M^{2/3}$. Esto es diferente de $M^{3/4}$ y además los animales no son geoméricamente

similares: sin embargo, su simplicidad la ha hecho suficientemente atractiva como para mantenerse. Hay algunas teorías que postulan variaciones en la composición del protoplasma activo con el tamaño, y otras, causas genéticas; tampoco resultan satisfactorias. Existe otra explicación a tener en cuenta por su elegancia al combinar principios de ingeniería con empirismos biológicos, incluyendo el principio de similaridad. Sugiere que es necesario un incremento desproporcionado de la sección transversal para soportar mayor masa corporal: el diámetro debe aumentar como $L^{3/2}$.

Quizá la relación sea simplemente una regularidad estadística. Si fuera así, muchos científicos habrían estado malgastando su tiempo tratando de encontrar un mecanismo para explicarla —si es que alguna vez se puede calificar de derroche a la investigación, aunque sea infructuosa en su fin original.

Además de curiosas y atractivas, estas relaciones resultan útiles en campos de la ciencia tan diversos como la paleontología, la zoología (se han cometido errores taxonómicos en el establecimiento de nuevas especies según las proporciones entre diferentes partes del cuerpo, al no tener en cuenta que éstas varían alométricamente y no linealmente a lo largo del crecimiento), la fisiología, la ecología, la etología o la misma farmacología (es famoso el caso de un elefante muerto por un error alométrico en el cálculo de su dosis máxima tolerable de LSD).

2.4.4.2. Evolución y límites de tamaño

Al aumentar el tamaño y disminuir la relación superficie/volumen, dificultando la difusión del calor generado, se produce un aumento de la temperatura interna y hay un ahorro aparente en el mantenimiento por unidad de biomasa. Este aparente ahorro es en realidad una mejor funcionalidad de los equipos enzimáticos, que pueden trabajar a la misma temperatura óptima. La adquisición de la regulación térmica en algunos animales ha aparecido como una consecuencia inevitable. La evolución ha sacado provecho de la circunstancia para estabilizar la temperatura, optimizando así las condiciones de funcionamiento de los sistemas enzimáticos.

En los animales de temperatura constante, los endotermos, ha habido ahora otro salto equivalente al que llevó a los ectotermos a endotermos al aumentar de tamaño: es el llevado a cabo por el hombre con la utilización de la energía externa, que le permite consumir muchísima más energía por unidad de biomasa que cualquier otro ser vivo. Lo que ocurrirá tras este salto es motivo de divagación y polémica (véase 5.3.1).

Parece, pues, que han habido tendencias evolutivas hacia un tamaño mayor. ¿Hay límites, tanto máximo como mínimo, en el tamaño? Parece que sí. El máximo viene impuesto por los problemas de locomoción y soporte contra la fuerza de gravedad. El esqueleto de un elefante constituye un 27% de la masa del cuerpo, mientras que el del ratón es sólo un 5%. La ballena azul pesa 15 o 20 veces más que un elefante, pero, gracias al soporte del medio, sólo necesita un esqueleto del 15% al 18% de su masa. El tamaño mínimo de un animal endotermo no se explica tan fácilmente. Cuando disminuye la masa, por causa de la relación alométrica la intensidad del metabolismo aumenta, el ritmo de vida es más rápido y se debe asegurar una entrega adecuada de oxígeno y glucosa sanguínea y eliminar los productos de desecho. En un caso extremo, todo el animal sería capilares y enzimas. Además, debido a su mayor relación superficie/volumen, los animales pequeños tienen menor inercia térmica y un rango de temperaturas neutrales más estrecho. Quizá los límites los impongan también la reproducción o el crecimiento, pues la fecundidad, la velocidad de reproducción y la masa del neonato están inversamente relacionadas con el tamaño del adulto. Se podría llegar a un supuesto extremo de estas relaciones alométricas en que si los adultos fuesen muy pequeños no tendrían tiempo de reproducirse, o los recién nacidos serían relativamente demasiado grandes, tanto como los progenitores.

2.4.4.3. El hombre

La media normal de la masa del hombre es de 60 a 70 kg. A partir de este dato se pueden predecir muchas de sus características, según las relaciones alométricas establecidas para el conjunto de los mamíferos. Sin embargo, el ser humano vive

tres veces más de lo esperado, tiene un cerebro seis veces mayor de lo que le corresponde y los que viven en países desarrollados consumen cien veces la energía basal. ¿No podría emplear mejor este exceso de energía, de cerebro y de vida? Ésa es una cuestión a estudiar en la segunda parte.

III. EL ESPACIO Y LA ORGANIZACIÓN

Las cosas no ocurren en un solo punto, dos elementos no pueden ocupar el mismo espacio. Esta es otra de esas grandes y pocas leyes de «prohibido el paso» que existen en la ecología. El ecosistema no es sólo una sucesión de momentos en el tiempo, aspecto que muchas veces es el único considerado. De hecho, espacio y tiempo van inextricablemente juntos. En la sucesión ecológica, a una pérdida de importancia del tiempo, con una disminución progresiva de cambios, le sigue una mayor importancia de la organización espacial: el ecosistema se diversifica. La ocupación del espacio es la base de la estructuración de los ecosistemas, y a su vez, las actividades de los organismos confieren una estructura al espacio. Como consecuencia, los ecosistemas tienen una estructura de grano diverso; aparecen las fronteras y las asimetrías entre distintas unidades, y con ellas, la explotación.

3.1. LOS ECOSISTEMAS

¿De dónde surgió y qué entienden los ecólogos por eso que tantas veces aparece en los medios de comunicación, el ecosistema?

El origen de este concepto hay que buscarlo en los intentos de describir y catalogar las comunidades de plantas, intentos que ocuparon gran parte del esfuerzo inicial de los ecólogos en las décadas de formación de la ecología moderna. El que en las latitudes templadas encontrasen relativamente simple la descripción de las asociaciones de plantas fue debido a que las comunidades suelen caracterizarse en esas latitudes por especies dominantes. Unas cuantas especies son capaces de conseguir tal ventaja competitiva que las mismas plañías aparecen en hábitats relativamente homogéneos de muchas hectáreas de extensión que pueden agruparse naturalmente. De todos modos,

esta composición de especies relativamente uniforme depende siempre de la uniformidad del hábitat. Las comunidades discretas no existen sino en hábitats discretos.

Dos aproximaciones paralelas de la moderna ecología han resultado de estos hallazgos de la fitosociología: los estudios de los ecosistemas y los de las interacciones entre especies para producir las estructuras de las comunidades. El estudio de los ecosistemas busca hábitats con bordes reconocibles por ecotonos —separaciones claras de las características y de las condiciones—, y después examina el flujo de energía entre los niveles tróficos y el transporte de materiales dentro de los compartimentos del sistema que ha definido. La estructura de la comunidad se estudia a través del impacto de una especie sobre otra, sea enemiga, competidora, o amiga, y la ecología de la comunidad no es sino una extensión de la ecología de poblaciones.

El concepto de ecosistema entra de lleno en la definición de sistema aportada por la teoría general de sistemas de BERTALANFFY (1968), según la cual una variación en un componente del sistema se relaciona con todos los demás componentes. Esto invoca uno de los aspectos más conocidos de la ecología, las relaciones comunales dirigidas por un flujo de energía. Por ecosistemas se entiende, generalmente, las comunidades vivientes, junto con los factores no vivos asociados, físicamente constreñidas o definidas en el espacio. El mayor ecosistema es la biosfera, que puede ser definida como el material vivo de la Tierra junto con los factores abióticos asociados. Sin embargo, otra acepción de biosfera, la más usada en los libros de divulgación, presenta una diferencia sutil: según esa acepción la biosfera sería la envoltura terrestre que contiene la vida, y se habla especialmente del mundo inanimado que sirve de soporte a la vida más que de la vida en sí.

Los ecosistemas son sistemas complejos como el bosque, el río o el lago, formados por una trama de elementos físicos (el biotopo, o escenario de la vida) y biológicos (la biocenosis o comunidad de organismos), y parecidos en su funcionamiento general. Necesitan una fuente de energía, la solar, junto con otra subsidiaria —en última instancia también derivada de la solar: el viento, la lluvia, las corrientes de agua...—. Y en

todos los ecosistemas existen unos ciclos de materia y energía, complejos y variados, pero en todos los casos regulados por los organismos a través de los eslabones tróficos (productores, consumidores y descomponedores) que re- ciclan la materia — en un ciclo cerrado— y dejan pasar la energía —en un ciclo abierto—. La energía no «se degrada y ya está»: el fruto de su acción es la organización que genera.

3.1.1. Ecosistemas acuáticos y ecosistemas terrestres

Por poco que pensemos sobre las palabras, nos daremos cuenta de que es inapropiado llamar Tierra a este planeta, cuando es evidente que debería llamarse Mar. pues casi tres cuartas partes de la superficie de nuestro mundo son mares. Esto explica su bello aspecto azul en las fotografías tomadas desde el espacio.

La vida escogió para nacer, ¿cómo no?, el mar. Las condiciones de temperatura, irradiación, gases disueltos y nutrientes minerales abundantes en las aguas costeras poco profundas eran ideales para el desarrollo y diversificación de las primeras plantas y animales. De las dificultades de colonización de la tierra firme nos puede dar una idea el lapso de varios miles de millones de años transcurrido entre la aparición de vida en el mar y la aparición en tierra firme. Sin embargo, a pesar de la dureza de las condiciones en los ambientes terrestres, en ellos se ha desarrollado generalmente un mayor grado de diversidad orgánica y productividad. Para entenderlo, uno se ha de fijar más en el contraste que hay entre el agua y el aire que en el que hay entre el agua y la tierra. Las propiedades en mayor proporción determinantes de la forma y el funcionamiento son la densidad —800 veces mayor— del agua y su capacidad de disolver gases y minerales. Provee por tanto un soporte cómodo para los organismos. Sin embargo, su mayor viscosidad dificulta la movilidad hasta cierto punto. Los animales pueden ser muy grandes, como las ballenas, que pueden llegar a pesar más de 100 t. cuando los elefantes pesan sólo siete, lo que se manifiesta también en su esqueleto y explica su sofoco cuando embarran-

can en nuestras playas. Otra importante propiedad es la atenuación exponencial de la luz, que limita la fotosíntesis, proceso también dificultado por la menor difusividad de los gases en el agua. También es resaltable el hecho de que el agua presenta su mayor densidad a 4°C, lo que evita que los lagos se hielen totalmente.

En cambio, en tierra el problema crítico es la limitación y el riesgo de pérdida de agua, como hemos visto en 2.4. Además, los cambios de temperatura son mayores que en el agua, que tiene un mayor calor específico —es necesaria mayor cantidad de calor o frío para cambiar su temperatura.

En los ecosistemas acuáticos el ciclo de la materia se desarrolla en un gran espesor de agua. En los océanos, sólo hay luz suficiente para llevar a cabo la fotosíntesis en los 50 o 100 primeros metros de espesor, mientras que su profundidad media es 4.300 m. El destino final del fitoplancton (los productores primarios) es la sedimentación. Los animales favorecen esta tendencia, pues muchos comen en la superficie y defecan a mayor profundidad (véase 4.2). Como resultado, se acumulan los elementos nutritivos reguladores, fósforo y nitrógeno, en las capas profundas, siendo su retorno a las iluminadas muy lento (fig. 11). Y como consecuencia, la producción es frenada a niveles parecidos a los de los desiertos terrestres (fig. 19), lo que ha de desengañar a quienes ven en los océanos la solución al problema de la alimentación de la creciente antroposfera. En tierra, las plantas son gigantescas comparadas con las acuáticas, y tienen muy bien estructurado el sistema de transporte de agua y nutrientes según un eje definido por la luz y la gravedad (fig. 22). Así, el ciclo de la materia no se extiende hasta los 4.300 m de media de profundidad como en los océanos, sino en un espesor mucho menor, el de la vegetación, que puede alcanzar 50 m en los bosques, y como máximo 2 m suplementarios en el suelo.

En los ecosistemas terrestres, la biomasa de los animales representa una fracción mucho más pequeña de la biomasa total que en los acuáticos, y no hay ejemplos en tierra de un control tan absoluto de los animales sobre los ecosistemas como, por ejemplo, el que ejercen las madréporas de los arrecifes, a

no ser el del hombre o, en menor grado, los ternes y ciertas aves acuáticas.

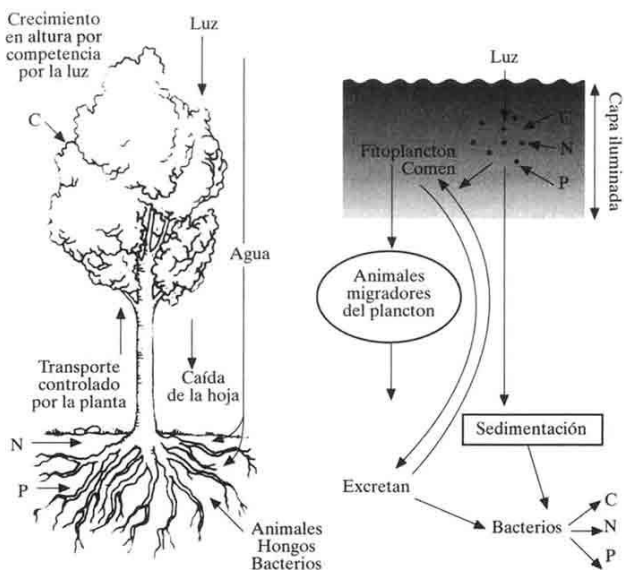


Fig. 22. Organización comparada del plancton y de un árbol. (De MARGALEF, 1981.)

Veamos, aunque sea muy someramente, las características más destacables de los ecosistemas más comunes. El tratamiento que se ha dado a cada uno de ellos difiere. El charco, el río o el bosque son presentados desde el punto de vista de un escolar de EGB, mientras que el lago, el mar, el suelo o el aire lo son desde la óptica de un estudiante universitario de biología. El lector podrá escoger así en función de su menor o mayor interés en profundizar en la ciencia ecológica.

3.1.2. Un ecosistema acuático a mano: los charcos y estanques de los parques

Por todas partes, en el campo y en las ciudades, encontramos charcos y pequeños embalses. En los parques urbanos

también suele haberlos, y constituyen un buen ejemplo para entrar en contacto con la naturaleza, con el mundo desconocido del microscopio y con los ciclos de la energía y de la materia, y nos puede ayudar a cuestionarnos sobre las cosas no evidentes a simple vista, su qué, su cómo y su porqué.

Para estudiar y comprender el funcionamiento del ecosistema, los estudiosos van por partes:

- 1) Descripción física: origen, localización, morfometría...
- 2) Calidad de las aguas: transparencia, sales minerales, materia orgánica disuelta y en suspensión, gases disueltos...
- 3) Dinámica: ciclo anual de estas características, del flujo de agua, de la temperatura...
- 4) Organismos: el plancton y el bentos y su colonización.
- 5) Relaciones tróficas: ciclos de la energía y de la materia.

El agua de estos charcos soporta miles y miles de organismos en cada centímetro cúbico. Estos organismos se pueden agrupar en:

a) Bacterias, hongos y virus. Los hay de muchas clases y formas. Descomponen la materia orgánica y por tanto la reciclan. Los virus se conocen muy poco.

b) Fitoplancton. Constituido por algas microscópicas, distribuidas en diversos grupos taxonómicos: cianobacterias (algas azules), clorofíceas (algas verdes), xantofíceas (algas verdeamarillentas), crisofíceas (algas doradas), bacilariofíceas (diatomeas), criptofíceas, dinofíceas, euglenofíceas, etc. Todos estos grupos tienen en común la posesión de clorofila para utilizar la energía solar. Los individuos que los forman miden de 5 a 600 pm. aunque pueden agruparse formando grandes masas que los hacen visibles (recuerde el lector las películas que a menudo se forman sobre muchas aguas estancadas).

Estos organismos deben mantenerse en el agua sin hundirse. Algunos, como las cianobacterias, lo consiguen gracias a vesículas de aire y otros acumulan aceite, pero la gran mayoría son más densos que el agua. Para mantenerse en suspensión han desarrollado distintas estrategias: aprovechar las corrientes

de agua generadas por el viento, impulsarse por flagelos, adoptar formas planas con muchas proyecciones, envolverse con mucílagos... De todas maneras, al hundirse pueden renovar las capas de agua envolventes y por lo tanto los nutrientes minerales y orgánicos.

La vida de estas microalgas, de las que hay, según el tipo de charca, hasta millones de individuos por centímetro cúbico, es muy vulnerable: muchas son comidas por el zooplancton, y muchas otras se hunden. Esto hace que necesiten reproducirse muy rápidamente para reemplazar los individuos perdidos. El mecanismo más utilizado es la división celular.

c) Zooplancton. Constituido principalmente por protozoos, rotíferos y crustáceos (especialmente cladóceros y copépodos). Los primeros no son demasiado bien conocidos. Se conocen mejor los rotíferos, organismos que toman el nombre del movimiento aparentemente rotatorio —para allegar alimento— de los cilios que circundan su boca. Algunos cladóceros y copépodos filtran el agua y otros depredan el fitoplancton y el zooplancton más pequeño.

d) Macroinvertebrados y peces. Organismos nadadores que comen detritus, vegetales u otros organismos vivos más pequeños. Destacan las larvas y adultos de insectos (coleópteros, heterópteros...)

e) Bentos. En el fondo se encuentra el detritus procedente de la sedimentación, y además crecen plantas (briófitos. carófitos. algas filamentosas, algas microscópicas, fanerógamas que frecuentemente presentan hojas y flores en la superficie del agua como el *Nuphar*) y animales (protozoos, poríferos —esponjas—. celentéreos —hidras—. platelmintos. nemátodos. oligoquetos. hirudíneos —sanguijuelas—, crustáceos, moluscos, insectos...).

f) Detritus. Puede ser autóctono (excreciones y cadáveres de los organismos nombrados) o alóctono (material procedente de alrededor del charco, como hojas, troncos, desechos...).

La materia circula a través de esos compartimentos (fig. 23) de tal manera que, sobre todo en verano, pasa por todos ellos

en poco tiempo. Esta circulación se produce gracias a la energía solar, que los organismos fotosintéticos utilizan junto a las sales y gases disueltos para sintetizar materia orgánica e iniciar el ciclo que prosigue con el zooplancton, los macroinvertebrados y los peces. Las bacterias y los hongos descomponen la materia orgánica convirtiéndola en sales disueltas, cerrándose así el ciclo.

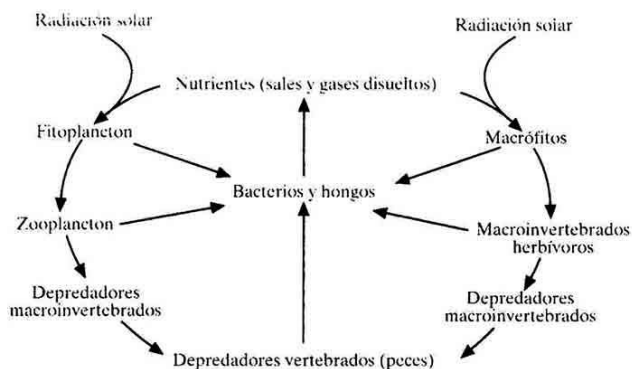


Fig. 23. Representación esquemática de los distintos componentes del ecosistema del estanque y sus relaciones.

En todo este conjunto se producen continuos cambios de tipo físico, químico y biológico. Es especialmente pedagógico considerar los cambios estacionales del plancton. Las condiciones fisicoquímicas del agua (la luz, la temperatura, el movimiento, etc.) varían con las estaciones y hacen que las condiciones óptimas para el desarrollo de determinadas especies se sucedan. Suele haber un máximo poblacional en la primavera y en el verano, cuando la temperatura y la luz aumentan, y una disminución en otoño e invierno, cuando menguan. Es, pues, interesante observar el charco en cada estación, porque así se adquiere conciencia del cambio y de las razones que lo producen.

Durante las épocas difíciles, las especies se mantienen en poblaciones residuales, o quedan en la superficie de los sedimentos. Para la primera colonización, otras especies pueden ser

llevadas por los pájaros, el viento o el agua que entra por esorrentía.

3.1.3. El lago

Los lagos son charcos o estanques de mayor tamaño, así que la mayor parte de las características de esos estanques de los parques urbanos definen también el funcionamiento de los lagos, salvando las diferencias de escala.

Los lagos han sido desde siempre centro de interés para los ecólogos, pues son especialmente útiles para el estudio ecológico al encerrar comunidades inusualmente bien enmarcadas en el espacio y cuyo destino está bastante bien definido por fenómenos físicos conocidos.

La mayoría de las cubetas lacustres son de origen glaciar, volcánico o fluvial, o se forman por disolución de zonas calcáreas. A escala geológica, la mayoría son relativamente jóvenes. Los lagos pequeños tienen corta vida y los mayores no superan muchos miles de años de edad: en Europa se han formado desde la última glaciación.

Los lagos de nuestras latitudes, en la zona templada, sufren unos marcados cambios estacionales (explicados con algo más de detalle en 5.1): al llegar el verano, con el aumento de temperatura se estratifican, formando una capa superior cálida — y por tanto de menor densidad —, el epilimnion, que flota sobre una capa inferior más fría y por tanto de mayor densidad —, el hipolimnion, separadas por la termoclina, que actúa como barrera al intercambio de materiales (fig. 24). El epilimnion de un lago estratificado es mezclado por el viento, que genera un sistema de corrientes, entre las que destaca la circulación en células helicoidales muy características. En ellas, los movimientos superficiales provocados por el viento arrastran agua desde abajo.

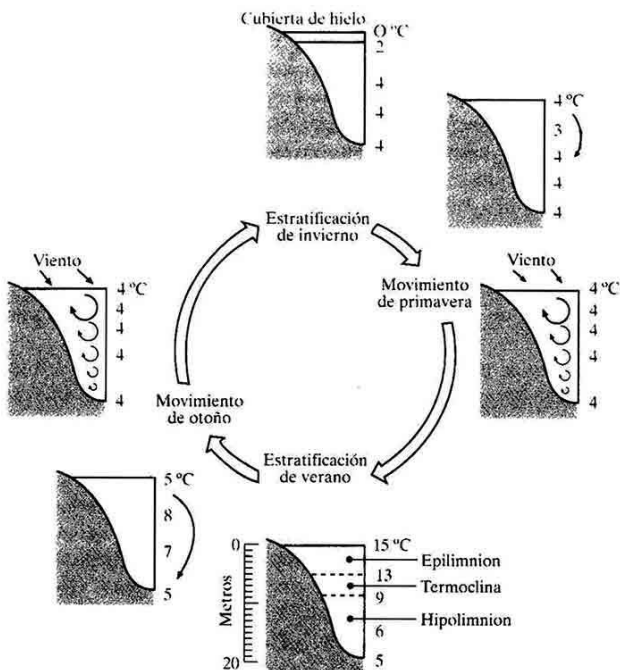


Fig. 24. Ciclo estacional de la temperatura y de la circulación en un lago templado, el Redó, en los Pirineos catalanes, en el que se aprecia la formación de la termoclina. (Datos de CATALAN. 1987.)

También se forman sistemas estables de estratificación cuando el agua del fondo contiene suficientes iones disueltos —suficientes sales— para hacerla significativamente más densa que el agua superficial. Estos lagos se denominan meromíticos.

3.1.3.1. Los nutrientes. La eutrofización

La concentración de nutrientes de un lago está condicionada principalmente por las entradas procedentes de la cuenca, pues los lagos no tienen muchas plantas de larga vida que puedan regular las existencias de nutrientes, como ocurre en los ecosistemas terrestres. La razón de que los lagos cambien su

estado tan rápidamente en respuesta a la polución en su sensibilidad a los aportes de la cuenca.

Las concentraciones de nutrientes en los lagos son generalmente muy bajas. El carbono es pocas veces limitante, mientras que el fósforo es generalmente tan escaso que su enriquecimiento siempre produce más crecimiento algal. Se trata del fenómeno de la eutrofización, «buena alimentación» si atendemos a las raíces griegas del vocablo.

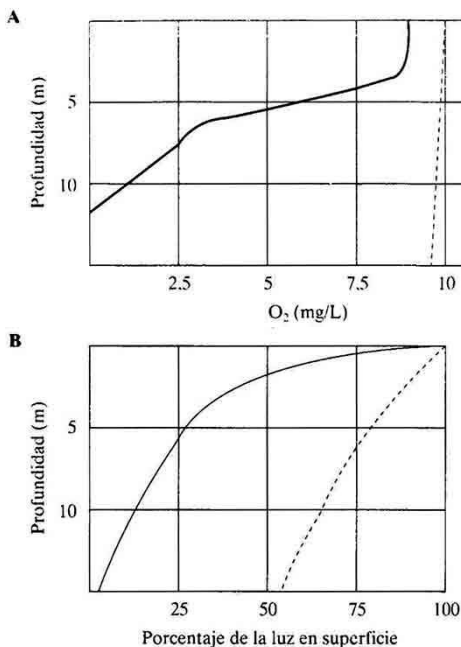
En los lagos de baja productividad, con pocos nutrientes (eutróficos, la estratificación estival tiene pocas consecuencias: pero si un lago es muy fértil —con muchos nutrientes (eutrófico)—, la concentración de vida vegetal en la capa superior cálida puede llegar a ser tan grande que forman una cobertura efectiva que impide la llegada de la luz a las capas inferiores. El agua fría y oscura de las capas inferiores es privada entonces del oxígeno del aire —consumido por la oxidación de toda clase de materiales orgánicos que van sedimentándose— y del que producirían las plantas. Una lluvia de material muerto cae desde las capas superiores y se descompone. La demanda biológica de oxígeno (DBO), es decir, su consumo por los procesos catabólicos de los organismos, puede agotar la reserva de este gas convirtiendo en anóxicas a las aguas profundas (fig. 25). Como los lagos se van llenando de sedimento, el volumen del hipolimnion se reduce, disminuyendo también las reservas de oxígeno del agua profunda. Esta observación llevó a la falsa conclusión de que contaminar un lago, y por lo tanto consumir su oxígeno, es lo mismo que envejecerlo.

3.1.3.2. Los organismos. Pequeño tamaño y sedimentación

Las algas flotantes de los lagos —el fitoplancton— pertenecen a diferentes divisiones del reino vegetal, con sistemas bioquímicos distintos. Los animales arrastrados —el zooplancton— son taxonómicamente menos diversos, proceden de unos pocos taxones. Crustáceos, insectos y rotíferos son los más abundantes (véase 3.1.2 y 5.1).

Una importante cuestión teórica generada por la vida planctónica es la coexistencia de numerosas especies en un lugar

donde la separación física de nichos parece difícil: me refiero a la paradoja del plancton ya comentada en el capítulo 1.



C

Características generales de los lagos oligotróficos y eutróficos

Características	Oligotrófico	Eutrófico
Ciclado de nutrientes	Bajo	Alto
Producción primaria	Baja	Alta
Producción secundaria	Baja	Alta
Peces detritívoros	Pocos	Muchos
O ₂ en el hipolimnion	Presente	A menudo, anoxia
Profundidad	Generalmente profundos	Generalmente poco profundos
Calidad del agua para uso humano	Buena	Mala
Diversidad de especies de organismos	Alta	Baja

Fig. 25. Perfiles típicos de oxígeno (A) y luz (B) en lagos eutróficos (trazo continuo) y oligotróficos (trazo discontinuo) estratificados en verano. En el oligotrófico crecen menos organismos, la luz penetra a mayor profundidad y sedimenta menos materia orgánica, con lo que se consume menos oxígeno. C) Tabla de las características generales de los lagos oligotróficos y eutróficos.

Muchas de las características de la vida del lago resultan del hecho de que las plantas de agua abierta son microscópicas. Las plantas grandes disfrutan ventajas de competencia, de reserva de grandes cantidades de nutrientes y de estrategias reproductivas basadas en esas reservas de energía y masa, utilizables como propágulos, que les aseguran la existencia en todos los hábitats bentónicos donde puedan enraizar. El fitoplancton, en cambio, paga un elevado precio por su pequeñez, al perder parte de su producción por excreción a través de su pared celular, delgada y de gran superficie. Se había argumentado que una gran relación entre la superficie y el volumen favorecía la absorción de nutrientes y evitaba el hundimiento: sin embargo, ambas funciones pueden ser asumidas también por formas mayores con flotadores o que desarrollen bordes enrollados. Quizá la razón estribe en que estas formas grandes serían barridas por el viento, mientras que las pequeñas pueden retornar repetidamente. Sea ésta la razón o no, que aún existe mucha controversia al respecto. La pequeñez comporta profundas consecuencias. La ley de Stokes relativa al tamaño y forma de las partículas implica un descenso lento del fitoplancton.

La mayoría de las algas son más densas que el agua. Puesto que han tenido largo tiempo para desarrollar flotadores —algunas los tienen—, y en cambio siguen hundiéndose, parece que este hecho debe de reportar alguna ventaja adaptativa, seguramente el ya señalado movimiento con bajo coste energético para conseguir nutrientes. La desventaja obvia es que pueden ser arrastradas a la oscuridad, pero está mitigada por la rápida reproducción y por la turbulencia de las aguas, que las devuelve a las capas superiores. Así pues, quizá la característica más sobresaliente de la vida en los sistemas acuáticos, tanto de agua dulce como marinos, es el pequeño tamaño de las plantas de agua abierta, y una consecuencia directa es que sus animales depredadores son también pequeños.

3.1.3.3. El movimiento a bajos números de Reynolds

Todos los organismos acuáticos tienen que nadar o hacer que el agua los mueva. Al ser la mayoría tan pequeños, el flujo que se produce es laminar, y en consecuencia, desde nuestra

óptica humana, es como si se moviesen a través de melaza o alquitrán. El flujo laminar o turbulento es determinado por el tamaño, la velocidad, la densidad y la viscosidad, y queda definido por el número de Reynolds:

$$Re = l V \rho / \mu$$

en que l = longitud (cm) del objeto que se mueve, V = velocidad (cm/s), ρ = densidad (g/cm^3) y μ = viscosidad del líquido (poises), A altos números de Reynolds, el flujo es turbulento, y a números muy bajos, laminar. La línea divisoria es aproximadamente 1.

Las algas y el zooplancton pequeño generan un flujo laminar al moverse a través del agua con un tamaño y una velocidad tales que producen bajos números de Reynolds, inferiores a 1. El agua que el hombre generalmente trata es turbulenta, con números de Reynolds muy superiores a 1.

La energía de locomoción se utiliza en parte para vencer la viscosidad del agua y en parte para vencer la inercia, la cual es baja en lo que hace a los organismos pequeños pero crece relativamente cuando las dimensiones aumentan. Por otro lado, al aumentar la velocidad, en el caso de los de dimensiones muy pequeñas la viscosidad aumenta más rápidamente que la inercia, lo que significa que a partir de ciertas dimensiones, al aumentar la inversión en energía crece rápidamente la velocidad que se puede conseguir. Quizá la presencia de cilios y flagelos arrastradores en los más pequeños y de miembros batientes posteriores en los mayores sean las estrategias de motilidad desarrolladas por los organismos en respuesta a estas leyes.

Como la vida en agua abierta es vivida a bajos números de Reynolds por causa del pequeño tamaño de la mayoría de los organismos, ésta tiene sus propias reglas de movimiento, caza y huida, constriñendo la forma en que los herbívoros pueden comer y resultando en sistemas de alimentación por filtración. Las implicaciones de todo ello sobre el comportamiento predatorio y filtrador son revisadas por KERFOOT (1980).

Los recientes estudios de la biota de los lagos muestran que precisamente la depredación, tanto la llevada a cabo por los peces como la realizada por algunos invertebrados, es muy importante en el establecimiento de la estructura de las comunidades lacustres.

El agua es transparente, estratificada y fluida. Las plantas responden a la fluidez con su tamaño microscópico. Hay poco almacenaje de biomasa en este sistema, y por lo tanto también poco de nutrientes. Todo ello hace que la cadena trófica empiece con plantas muy pequeñas y que haga a los herbívoros incapaces de escapar a la depredación aumentando su tamaño, como ocurre en tierra. Si los depredadores controlan las comunidades de los lagos es porque las circunstancias físicas así lo hacen posible.

3.1.3.4. La estructura dominada por el eje vertical de gravedad y luz

El componente vertical en la estructura del sistema físico es muy preponderante. Del acusado eje vertical de gravedad y luz que domina el medio lacustre podemos estudiar un ejemplo paradigmático.

Un ejemplo: límite de la profundidad a que colonizan los macrófitos

Los limnólogos —ecólogos que se ocupan de las aguas continentales— entienden por macrófitos las plantas acuáticas macroscópicas, es decir, las algas con un tamaño superior a varios centímetros, los briófitos, los pteridófitos y las fanerógamas. Estas últimas, las plantas superiores, desaparecen por debajo de los ocho o diez metros de profundidad en las aguas continentales de todo el mundo. Por el contrario, algas y briófitos no presentan este límite, llegando a encontrarse hasta a más de cien metros, profundidad a la que llega radiación por encima del punto de compensación (luz a partir de la cual la fotosíntesis supera a la respiración) en algunos lagos muy claros, como el Tahoe de California y Nevada. La limitación de la profundidad a que puede vivir parece relacionada con un rasgo distintivo de las fanerógamas, la presencia de espacios aéreos en sus tejidos. Así, la *Posidonia oceánica*, fanerógama marina

que apenas los tiene, o que si los tiene son muy reducidos, llega a colonizar hasta los 50 m de profundidad en mares muy claros.

Los posibles factores determinantes de esta característica distribución vertical de los diferentes grupos de plantas son los relacionados con la profundidad: la presión hidrostática, la irradiancia y la temperatura. Ha habido una larga controversia entre los limnólogos botánicos sobre cuál de estos tres factores era el determinante del comportamiento diferencial. Se han estudiado las evidencias de campo y se han llevado a cabo diferentes estudios experimentales en el laboratorio, llegándose finalmente a la conclusión de que el determinante de la desaparición de las fanerógamas en profundidad es el aumento de la presión hidrostática. Sin duda la extinción exponencial de la radiación afecta negativamente a las posibilidades de crecimiento, pero eso ocurre con los tres grandes grupos de macrófitos.

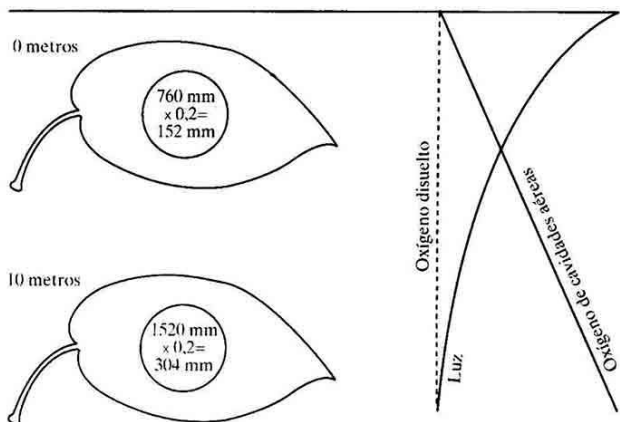


Fig. 26. Ejemplo del marcado eje vertical de gravedad y luz que domina el medio lacustre. Los factores limitantes de la fotosíntesis de las fanerógamas acuáticas aumentan con la profundidad. La luz disminuye exponencialmente y la presión parcial del oxígeno en las cavidades aéreas aumenta linealmente.

¿Cómo ejerce su efecto negativo la presión? Se había argumentado que lo hacía por oclusión de los espacios aéreos, impidiéndoles llevar a cabo sus funciones de transporte gaseoso

y sostén. Pero, realizando cortes histológicos de plantas sometidas a presión, se comprobó que no ocurría tal cosa. Después se ha constatado que es la elevada presión parcial de oxígeno que se genera en los espacios aéreos al aumentar la presión hidrostática (fig. 26), lo que produce el deterioro de las plantas e impide su crecimiento a profundidades superiores a los 10 m (PEÑUELAS. 1987c) (véase 3.1.8 y 4.6.1)

3.1.4. Los mares. ¿Por qué son salados?

En el caso del ecosistema oceánico, son válidas las consideraciones efectuadas hasta aquí en relación con los charcos, estanques y lagos, pero a una escala mayor que le confiere algunas características particulares. Entre las más interesantes están su enorme extensión (más de dos terceras partes de la superficie del planeta); su profundidad —la vida llega a todas las profundidades aunque con mucha menor densidad que en los márgenes continentales—: su continuidad: su circulación del agua —también continua—; su alcalinidad —con la gran capacidad tamponadora asociada—, y su frecuente limitación de nutrientes.

Pero quizá lo más llamativo para el no iniciado en oceanografía es lo que todos hemos notado al tragar agua en nuestros baños de mar: que es salada. El agua marina contiene una solución bastante concentrada (3,5%) de cloruro sódico, de «sal», a diferencia del agua aportada por los ríos, que contiene diversas mezclas de otras sales, carbonatos y sulfatos de potasio, calcio y sodio.

La explicación que hasta hace poco se daba del motivo de la salinidad del mar solía ser que la misma se debía a las pequeñas cantidades de sal que lluvias y ríos arrastran hacia él. La sal, no volátil, seguiría acumulándose y la salinidad iría aumentando con el tiempo. En este sentido se explicaría el menor contenido en sales de los fluidos corporales de los organismos surgidos ya hace mucho tiempo de los mares. De ser cierta esta teoría, nos permitiría cifrar la edad de los océanos en unos ochenta millones de años, lo que está en absoluta disconformidad con la paleontología. Tiene que haber, pues, un sumidero

de la sal que llega. La mejor evidencia de que la química oceánica ha sido constante a lo largo del tiempo geológico la proporciona la comparación del balance del sodio del océano con su edad radiométrica. Los ríos podrían haber aportado todo el sodio actual del mar y sus sedimentos en cien millones de años, y sin embargo los océanos tienen una edad mínima de quinientos millones. Una explicación completa de la química oceánica requiere un mecanismo que también se lleve la mayoría de los otros elementos de la tabla periódica que deberían haber aportado los ríos a lo largo del tiempo geológico. La mejor hipótesis es la que supone que los minerales de arcilla, los ácidos húmicos. Y los cadáveres de animales y plantas remueven selectivamente los diferentes elementos y los transportan hacia el sedimento oceánico. La bioturbación ejercida por los animales bentónicos que viven en los fondos probablemente ayude a refinar la química al bombear agua desde el oxigenado mar al sedimento químicamente reducido y de nuevo al mar. El agua que fluye, gana y pierde solutos a medida que su estado de oxidación varía, trabajando así como una bomba iónica. Parece que el dominio del sodio se debe a que los otros cationes aportados por los ríos son eliminados, bien en los estuarios, bien en los mares poco profundos. Se puede concluir que el sodio es ciclado entre la tierra y el mar, produciendo como resultado una concentración constante en el mar. El potasio es eliminado en la génesis de las arcillas depositadas en el sedimento. El calcio es eliminado por los seres vivos y depositado como roca carbonatada.

El sodio es equilibrado por el anión cloruro que, aparte del que viene como cloruro sódico, parece ser aportado al océano por las dorsales oceánicas, particularmente las cordilleras-centrales. La concentración de cloruro se mantiene más o menos constante porque esta pequeña entrada es compensada por pequeñas pérdidas a la corteza terrestre y a los sedimentos.

El diluvio de organismos muertos no es tanto un cortejo fúnebre cuanto una cinta transportadora que traslada sustancias de las zonas de producción superficiales a las áreas de almacenamiento de las profundidades.

Broecker, abundando en estas hipótesis, ha sugerido que una fracción del sodio y el magnesio es arrastrada a los fondos oceánicos con la lluvia de detritus que sedimentan continuamente sobre ellos, y que la remoción de cloruros y sulfatos tiene lugar porque se acumulan en forma de evaporitas en bahías de aguas someras, lagos interiores y brazos de mar aislados.

En todo caso, este fenómeno ocurre en el seno de una aleatoriedad que no explica la constancia de las condiciones. Lovelock sugiere que es Gaia la que efectúa el control biológico, lo que quiere decir que intervendrían mecanismos más amplios, que abarcan la Tierra entera. La salinidad no ha cambiado en cientos —si no miles— de millones de años. La materia viviente tiene que haber desempeñado un papel importante. Tenemos un buen ejemplo de ello en el caso del silicio. Los procesos de utilización y remoción pueden considerarse un eficaz mecanismo de regulación. Si los ríos aportan mayores cantidades de silicio, la población de diatomeas aumenta (suponiendo presentes otros nutrientes como sulfatos y nitratos), con lo que disminuye su nivel. Cuando desciende el aporte, las diatomeas limitan su producción hasta la recuperación del nivel de silicio. Como recuerda Lovelock, la construcción de barreras de coral que cierran miles de kilómetros cuadrados en las regiones tropicales es una prueba del potencial de Gaia, pues constituyen obras de ingeniería de dimensiones superiores a las de cualquier estructura humana actual.

3.1.5. El río. El agua que corre continuamente

El río es un ecosistema, un mundo, que a todos nos atrae, por la magia de sus aguas, que corren continuamente. Esa es su gran característica distintiva. Además, por lo menos en nuestro país, donde los lagos son escasísimos, los ríos son los ecosistemas acuáticos de agua dulce más a mano. Veamos de forma breve algunas de sus características más interesantes.

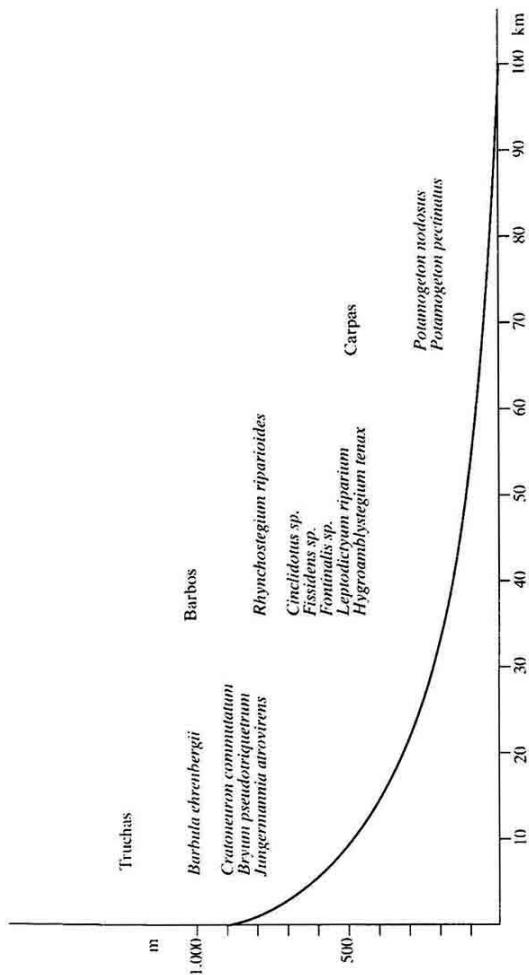


Fig. 27. Perfil longitudinal de un río mediterráneo (el Fluvià) en el que se señalan los peces y las plantas predominantes de los cursos alto, medio y bajo.

El río es agua que corre en un sentido único, de arriba abajo, a favor de la pendiente que lo dirige hacia el mar. La corriente

es el factor más importante de los que condicionan la vida en los ríos. Otros factores son el caudal, la temperatura y el tipo de sustrato. Estas características se traducen en los tipos de organismos de cada una de las partes del río (fig. 27). Este excava su lecho con la fuerza erosiva de su corriente y da lugar a su perfil, en el que, aunque el flujo sea continuo, por lo general, y aun teniendo bien presente la heterogeneidad del medio fluvial, se pueden distinguir, simplificando, los tres tramos clásicos: superior, medio e inferior.

El superior, en las zonas altas de la cuenca, presenta una fuerte pendiente que impulsa al agua a velocidades de 50 a 200 cm/s. El lecho está constituido por bloques de piedras y el agua está fría. Los organismos característicos son las truchas entre los peces y los briófitos entre las plantas. Predominan el aporte de materiales alóctonos y los organismos heterótrofos.

En la parte media, la pendiente es más suave. La velocidad del agua oscila entre 20 y 50 cm/s. excepto cuando atraviesa terrenos duros o cuando se enlentece en las balsas. La temperatura del agua es algo más alta, y los peces característicos son los barbos. Además de los briófitos. empiezan a aparecer fanerógamas en las aguas remansadas donde se acumulan limos.

En el tramo inferior, el río entra en las llanuras aluviales y pierde gran parte de su poder erosivo. La pendiente se aproxima al 1% y la velocidad de la corriente suele ser inferior a 20 cm/s. Se depositan los limos, las carpas —y los ciprínidos en general— son los peces más representativos, y las fanerógamas las plantas dominantes (los briófitos casi desaparecen por completo). Los organismos autótrofos tienen mayor importancia que en los tramos altos.

La composición del agua del río refleja de manera sutil la interacción del agua de lluvia con el suelo y las rocas. En realidad, las aguas dulces son los mejores indicadores del estado de salud de los ecosistemas terrestres, como se hace patente en el distinto aspecto que presenta el río después de un fuerte chubasco si ha drenado un espacio fuertemente erosionado o una zona industrial, o si ha drenado un bosque. Normalmente los bosques tienen suelos bien desarrollados que constituyen po-

derosos reguladores tanto del flujo del agua como de su composición química. No ocurre así en los suelos sin vegetación, generalmente erosionados, ni en los terrenos urbanos.

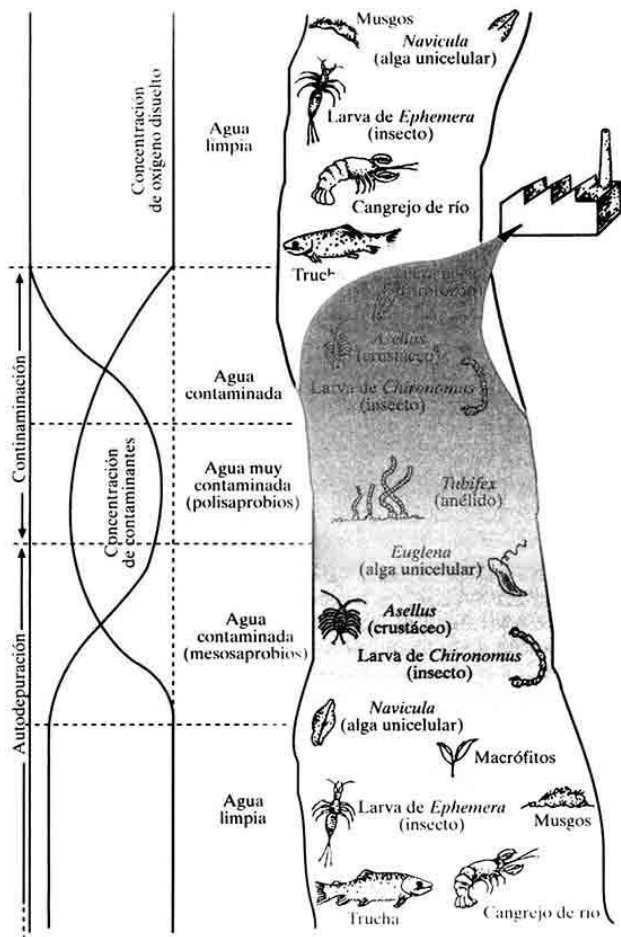


Fig. 28. Organismos indicadores de la calidad del agua en un río. (Modificado de MARGALEF, 1981.)

Mediante la materia orgánica, el bosque o los otros ecosistemas terrestres suministran una parte de los alimentos a los habitantes del río, primordialmente a los heterótrofos. La cadena trófica se inicia con los —en el río poco importantes— productores primarios, y sigue con los fitófagos, los carnívoros y los —en el río especialmente importantes— detritívoros y descomponedores, formándose así con todos ellos una compleja red trófica.

Estos organismos han sido utilizados a menudo, especialmente en los últimos años como indicadores de la calidad del agua (figura 28). La respuesta de la biota del río puede ser considerada como una integración del efecto de esta calidad en el tiempo, en función del ciclo y duración de vida de los organismos, mientras que las medidas directas de las características físico-químicas aportan sólo una información del instante en el momento de muestreo. Además, como la mayor parte de la contaminación industrial es discontinua, el uso de organismos indicadores puede proporcionar una información muy valiosa, difícilmente obtenible por otros medios. No se debe caer sin embargo, en el extremo de ver en la utilización de los organismos indicadores un fin en sí mismo y exagerar su uso y su valor en los informes medioambientales. Se han utilizado muchísimo los macroinvertebrados y las plantas, lo mismo las superiores que los briófitos y las algas (fig. 28), así como sus características pigmentarias a modo de indicadores de su estado fisiológico (Fig. 29).

3.1.6. El bosque

El bosque es el ecosistema terrestre de estructura más complicada. Su base la constituyen los árboles: sus hojas son las partes productivas y sus raíces y troncos componen el sistema de soporte y transporte. Los troncos de los árboles de crecimiento rápido, como el chopo, el eucalipto o el pino blanco tienen naturalmente la madera menos densa que los de crecimiento lento, como el castaño, la encina o el roble. Ya se ha señalado que la organización del árbol, la distribución y forma

de las hojas, constituye un prodigio de equilibrio para el aprovechamiento de la luz, CO₂ y el agua. Pero además, la organización de la cobertura vegetal del bosque condiciona enormemente el microclima o clima local; por ejemplo, en verano, cuando hace calor, la temperatura es más baja en el interior del bosque, ya que las diferentes capas de vegetación atenúan los rayos de sol y disminuyen la transpiración de las hojas con el consiguiente ahorro hídrico.

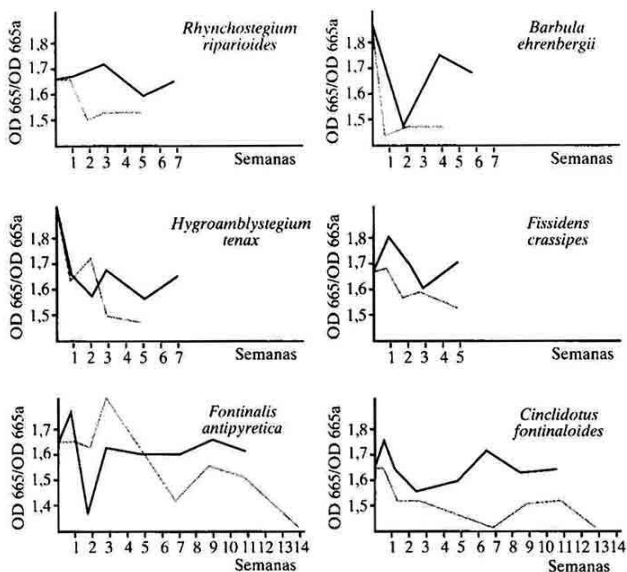


Fig. 29. Cambios de las características pigmentarias (OD665/OD665a) en diversos briófitos acuáticos trasplantados a un tramo del río Muga con poca polución (Boadelia, DBO 1 mg/L) y a otro con mayor polución (Castelló d'Empúries, DBO 17 mg/L).

Sobre la base de los productores primarios, entre los que destacan los árboles, se asientan los demás eslabones tróficos. Los herbívoros son muy numerosos y aparecen bajo distintas

formas, desde devoradores de hojas hasta comedores de madera, pasando por los frugívoros y los que chupan savia. Los insectos son muy abundantes. Entre los carnívoros del siguiente nivel trófico destacan las aves, que también consumen mucho alimento vegetal (frutos, etc.). Asimismo hay superdepredadores, grandes aves de rapiña y mamíferos. El grupo de los descomponedores, especialmente numeroso, se sitúa en la superficie y en el interior del suelo.

En el bosque vive, pues, una gran diversidad de organismos inferiores, que junto con los pájaros y los mamíferos completan una imagen muy representativa de lo que es un ecosistema. Todo él es muy resistente: sólo es frágil en presencia del hombre. En realidad, los bosques son elementos positivos de estabilidad en el paisaje.

3.1.6.1. El ciclo de los nutrientes

Sin vida, en los distintos hábitats habría entradas de nutrientes por la lluvia, la erosión y el aire: almacenamiento, en el agua y en la superficie de las rocas; salidas en el agua drenada, y una tendencia hacia la estabilidad, en el suministro de nutrientes. La vegetación regula el suministro por la modificación de cada parte del sistema. Las plantas incrementan la entrada de nutrientes por sus raíces profundas y por la extracción del CO₂ del aire, y aumentan el almacén añadiendo al hábitat materia orgánica viva y muerta. Una cobertura vegetal completa restringe la salida al regular la concentración de nutrientes en el agua del suelo. Además, la vegetación altera el flujo de agua del ecosistema al desviar una gran parte desde el suelo a la corriente de transpiración, que libera vapor de agua a la atmósfera. Puesto que la vegetación regula tanto el flujo de agua como la concentración de los nutrientes, ejerce un acusado control sobre éstos. La energía con que se lleva a cabo la desviación por transpiración no proviene de la fijada por fotosíntesis sino de la absorbida por las plantas como calor; así se aumenta mucho la eficiencia real de utilización de la energía solar.

Los balances de nutrientes pueden ser estudiados y seguidos a través de cuencas en que todas las salidas de agua convergen en un solo arroyo corriente. Estas cuencas pueden ser manipuladas experimentalmente para su estudio. Es famosa en este sentido la de X Hubbard Brook en Norteamérica. En nuestro país, se estudian cuencas experimentales en dos áreas como mínimo: en el Montseny y en la Sierra de Prades.

3.1.6.2. Bosques tropicales y templados

Algunos bosques tropicales tienen ciclos distintos a los de los templados. Exceptuando los valles de inundación y los jóvenes suelos volcánicos, los hábitats tropicales tienen pocos nutrientes almacenados en el comportamiento mineral del suelo o como materia orgánica muerta. Los nutrientes son ciclados más rápidamente que en los bosques templados. Hace más calor a lo largo de todo el año, lo que favorece la rápida descomposición del detritus. El lavado es favorecido por las abundantes lluvias. Como resultado, muchos suelos tropicales tienen menos nutrientes que los templados y las plantas los movilizan rápidamente. Por la misma razón, la proporción entre el detritus y la biomasa total aumentada desde menos de 1:1 en el bosque húmedo tropical a más del 10:1 en bosques templados. En realidad, el principal reservorio de nutrientes está constituido por los propios cuerpos de las plantas. La entrada de nuevos nutrientes vía polvo, lluvia o erosión es pequeña, y el almacén es mantenido por el eficiente sistema radicular asociado con hongos simbióticos que recapturan casi todos los nutrientes perdidos por las plantas vivas al morir o descomponerse. Por tanto, los bosques tropicales típicos son inestables, en el sentido de que la destrucción del bosque significa la perturbación de los ciclos de nutrientes y su pérdida, que no puede ser inmediatamente reemplazada.

Tal vez los peores enemigos del suelo tropical sean los monocultivos de café, té, caucho, tabaco, etc., que ejercen una protección escasísima sobre el suelo, ya pobre de por sí, de forma que se agota en pocos años. Por supuesto, sus cosechas representan la extracción de una fracción elevada de elementos

esenciales, a menudo no compensada o inadecuadamente compensada por la fertilización. Entonces los cultivos se desplazan, dejando tras de sí tierra estéril.

Los diferentes balances de nutrientes de los bosques tropicales y templados están determinados por los factores físicos del hábitat, principalmente la temperatura. En los otros biomas terrestres, los balances dependen también del ambiente físico. Así, en los prados hay reservorios en el suelo a la manera de los bosques templados: también en la tundra los suelos contienen nutrientes, pero la vegetación depende de la tasa según la cual éstos pueden ser liberados a las bajas temperaturas reinantes.

3.1.7. El suelo

Continuamente estamos hablando del suelo. De su importancia da prueba el que las civilizaciones humanas surgieran sólo cuando el balance de los nutrientes dejaba grandes reservas en el suelo, tanto en los hábitats templados como en los tropicales fértiles y en los valles de inundación. Estudiémoslo con un poco más de detalle.

El suelo es la parte de los ecosistemas terrestres donde crecen las plantas. Para el ecólogo, es la fina capa terrestre reconstruida por la vida y el clima. Cada ecosistema tiene su suelo característico, con su propia mezcla de materia orgánica y su serie de capas. La edafología —o pedología en los países anglosajones— es la ciencia que se ocupa de su estudio.

En el suelo hay pequeños animales, insectos, ácaros, gusanos y una masa muy importante —generalmente mayor que la de todos los animales del bosque— de bacterias y hongos, que usan la materia orgánica. Algunos de los filamentos de los hongos, sus micelios, establecen conexiones con las raíces de los árboles, que transportan agua y nutrientes, asociándose hasta hacerse necesarios para la planta y constituyendo la denominada micorriza. Muchos de los hongos más apreciados culinariamente producen micorrizas de especificidad considerable, producto de la coevolución.

Duchaufour define al suelo como un medio complejo caracterizado por una atmósfera interna, una economía hídrica particular, una flora y una fauna determinadas y una colección de elementos minerales, es decir, un medio dinámico que nace y evoluciona. Aparte del aire y del agua, encontramos materiales de dos procedencias: la alteración de la roca madre por la acción conjunta de los factores climáticos (meteorización) y de los organismos vivos proporciona elementos minerales diversos; por otra parte, estos seres vivos producen materia orgánica que se incorpora a su vez a los elementos minerales. El suelo se va formando en el material suelto de la superficie de la tierra por procesos que actúan desde arriba, principalmente a través de la percolación del agua. Ello da como resultado las series de capas llamadas horizontes (fig. 30). El superficial, denominado A. recoge materia orgánica de la vegetación pero carece de materia orgánica y minerales solubles, pues son lavados hacia los horizontes inferiores por el agua de drenaje.

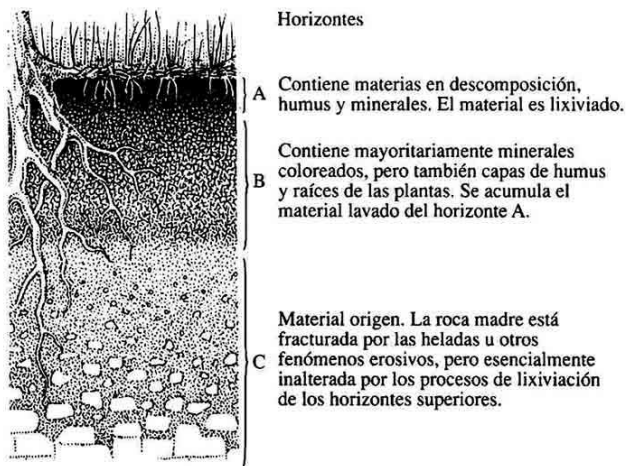


Fig. 30. Perfil idealizado del suelo. (Basado en COLINVAUX, 1986.)

A más profundidad en el perfil del suelo, los materiales orgánicos y minerales procedentes de las capas superiores pue-

den ser depositados en el horizonte B. en el que se pueden formar nuevos minerales, como las arcillas. Debajo del horizonte B de acumulación y síntesis está la roca superficial, probablemente fracturada pero bastante inalterada, a la que se denomina horizonte C o roca madre del suelo. En el bosque, el suelo ha adquirido una estructura compleja con la virtud, entre otras, de intercambiar con el agua que lo atraviesa parte de sus componentes. Ésta sale con poca concentración y además uniforme. Los árboles protegen así al suelo de la erosión. De ahí que la explotación forestal excesiva impida su papel protector.

En cualquier clima o vegetación, esta roca que da directamente origen al esqueleto del suelo variará en conformidad con las características de las rocas locales, pero las propiedades esenciales de las dos capas superiores permanecen constantes. Los perfiles del suelo dependen más del clima y la vegetación que el tipo de roca. El suelo se desarrolla de forma paralela a la vegetación, de modo que las distintas partes del mundo y los diferentes tipos de vegetación tienen perfiles de horizontes característicos. Los primeros mapas ya correlacionaban los tipos de suelos con la vegetación y el clima, correlación que fue uno de los primeros inspiradores del concepto de ecosistema. Los grandes grupos de suelos son a grandes rasgos equivalentes a los de las grandes formaciones vegetales. Han recibido nombres que, como podsol para el suelo del bosque boreal, han tenido largo reconocimiento internacional; pero las definiciones son poco rígidas, y estos nombres han sido sustituidos en algunos países, como por ejemplo los Estados Unidos. Clasificar grupos relacionados es difícil y comparable a clasificar comunidades de plantas o ecosistemas enteros, pero hay detallados conjuntos de normas que se utilizan como guía por parte de los edafólogos.

3.1.7.1. Suelos rojos en los trópicos y marrones en las zonas templadas

Una intrigante observación general es la tendencia de los suelos tropicales (oxisoles) a ser rojos, mientras que los suelos de latitudes altas (podsoles) tienden a ser marrones o grises.

Alguna teoría explicativa, como la de la diferencia de pH, menor en el podsol que en el oxisol, no es totalmente convincente, puesto que en todos los casos nos movemos dentro de un rango de pH en que los silicatos son muy insolubles. Es probable, según ha sugerido Ugoloni (COLINVAUX, 1986), que los complejos orgánicos quiten sesquióxidos rojos y aluminio de los suelos templados, posibilitando que los silicatos grises se acumulen, cosa que no ocurriría en los suelos tropicales, donde los voraces descomponedores eliminan rápidamente el humus y hacen posible la permanencia y acumulación los sesquióxidos rojos. El color del suelo puede, por tanto, depender también de los procesos vivos en el seno del ecosistema, en lo que constituiría una prueba más del papel determinante de la biosfera en el moldeado de la Tierra, de la existencia de esa Gaia organismo terrestre.

3.1.8. El aire. Una atmósfera oxidada

3.1.8.1. El mantenimiento de la atmósfera por los seres vivos

Los tres principales gases del aire, O_2 , N_2 y CO_2 , también son mantenidos por procesos biológicos, al menos en parte. Así lo podemos apreciar observando las figuras de los ciclos del C, O y N (figs. 8, 9 y 10). Además, sus concentraciones han sido determinadas por la vida a lo largo de la historia geológica, y ésta, a su vez, sería imposible sin la atmósfera.

La característica más destacable de nuestra atmósfera es la abundancia de oxígeno. Ello parece consecuencia de los procesos que anularon el carácter reductor de la corteza y la atmósfera primitivas. Al principio ejerció un importante papel el proceso de disociación del agua en H_2 y O_2 , causado por las radiaciones solares. Después, desde la aparición de seres vivos y hasta la actualidad, la fotosíntesis ha sido el principal proceso productor de oxígeno. En cuanto al mantenimiento del 21% de O_2 , la hipótesis más plausible pasa por un mecanismo de *feedback* sedimentos-atmósfera y por la regulación ejercida por las bacterias sulfatorreductoras que liberan O_2 y H_2S , reoxidado luego en la atmósfera (fig. 9).

El N_2 resulta especial porque es inerte químicamente y porque su gran reservorio es la propia atmósfera. La pérdida de N_2 por fijación biológica e industrial y por formación de nitratos en las tormentas es compensada por la acción de las bacterias nitratorreductoras, que utilizan el nitrato como aceptor de e^- en condiciones de anaerobiosis.

Aunque pueda parecer extraño, el gas menos controlado biológicamente es el CO_2 . La baja concentración en el aire se mantiene por la disolución en el océano, que actúa así como un enorme tampón, a su vez tamponado por la deposición de rocas carbonatadas en los mares poco profundos. La tasa de taponamiento está, sin embargo, limitada por la relativa lentitud de mezclado de las masas de agua. En consecuencia, en las últimas décadas ha ido aumentando su concentración como resultado de la combustión de materiales fósiles y de la deforestación y desecación de zonas húmedas.

Las concentraciones de O_2 y N_2 en la atmósfera contemporánea son tan enormes y están tan bien controladas, que de momento difícilmente pueden ser afectadas por la actividad humana. No ocurre lo mismo con el CO_2 , dada su mucho menor concentración, de modo que el aumento que provoca la acción del hombre puede tener efectos climáticos de magnitud no previsible con exactitud (véase 6.6).

3.1.8.2. *¿Cómo se formó esta atmósfera?*

Hace más de tres mil quinientos millones de años, pequeñas criaturas pobladoras de mares poco profundos empezaron el proceso que dio a la Tierra su atmósfera actual, rica en oxígeno. Ésta es la conclusión a que ha llegado un grupo de científicos de Berkeley dirigidos por Schopf, tras estudios realizados sobre fósiles microscópicos de Australia. Con anterioridad a este hallazgo, las formas de vida confirmadas como más antiguas fueron identificadas en Canadá en pizarras de dos mil ochocientos millones de años de edad.

Una vez más se refuerza la teoría de que la vida ha desempeñado un papel fundamental en la historia geológica de la Tierra (Gaia); pero, además, si esto se confirma totalmente, se de-

mostrará que el ecosistema terrestre estaba ampliamente establecido, en un nivel primitivo, mucho antes de lo que se había creído hasta hace muy poco. Generalmente, se ha venido considerando que la Tierra se formó como parte del sistema solar hace unos cuatro mil quinientos millones de años. Este nuevo hallazgo implica, pues, la existencia de una importante evolución antes de los cuatro mil quinientos millones de años. ¿Cuánto tiempo antes? No se sabe; pero debió de ser unos cientos de millones de años, para dar lugar a los fósiles ahora estudiados.

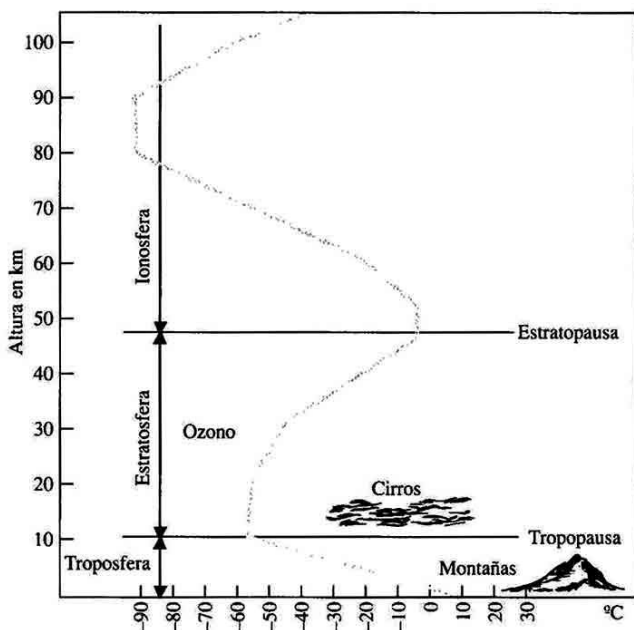


Fig. 31. Estructura vertical de la atmósfera, con el gradiente de la temperatura media. (Modificado de MARGALEF, 1974 y de GRIBBIN, 1986.)

La aparición de la vida y su capacidad de liberar oxígeno representa un papel fundamental en casi todas las teorías acerca de cómo se formó la atmósfera actual, dominada por nitrógeno

y oxígeno tras partir de amonio, nitrógeno, metano, agua y dióxido de carbono. Pero hallar evidencias es muy difícil, porque quedan muy pocas rocas tan antiguas. Las nuevas pruebas, ahora aportadas, provienen de objetos visibles a través del microscopio en una formación geológica en estudio desde 1980. Los fósiles se hallan en rocas sedimentarias ricas en cuarzo formadas en los fondos de océanos someros hace entre tres mil quinientos millones y tres mil setecientos millones de años. Se han identificado unas diez especies de bacterias, de tamaño, forma y característica generales muy similares a las actuales cianobacterias, «las algas azules», que liberan oxígeno como resultado de la fotosíntesis. Aunque no se puede probar que las especies fósiles produjesen oxígeno hace tres mil quinientos millones de años, parece que por lo menos todas las actuales sí lo producen.

Además, los organismos fósiles estudiados presentan otra característica sobresaliente: constituyen las colonias más antiguas hasta ahora conocidas. Hasta hace veinte años no se podía asegurar la autenticidad de los fósiles más allá de los seiscientos millones de años de antigüedad, período en el que aparecieron los organismos multicelulares capaces de desarrollar partes duras como las conchas, de prolongada duración (fig. 36).

La rapidez con que los nuevos conocimientos hacen retroceder la aparición de la vida en la Tierra ha abierto la especulación de que, dadas las condiciones adecuadas, ésta puede surgir rápidamente en cualquier otra parte del universo.

La aparición del oxígeno y su impacto

Si una persona pudiese retroceder en el tiempo tres mil quinientos millones de años a la zona estudiada en Australia, se encontraría con un lago poco profundo, cenagoso, repleto de microorganismos de color verde, con la tierra firme carente de toda forma de vida, y no hallaría organismos superiores a las bacterias. Un viajero del tiempo como éste, debería llevar una botella de oxígeno para sobrevivir a pesar de la abundancia de organismos productores de este gas. pues aunque el tiempo necesario para producir una atmósfera con el oxígeno de la actual

es asombrosamente corto si se imagina una población de productores primarios en crecimiento exponencial y con recursos suficientes, se estima que los niveles de oxígeno no se elevaron lo suficiente para la respiración de los animales modernos hasta hace quizá mil millones de años, gracias a que, al principio, el oxígeno fue rápidamente consumido en oxidar el hierro disuelto en el agua y en los suelos: la Tierra tuvo que oxidarse antes de poder elevar la concentración de oxígeno atmosférico. Y nunca mejor empleado el vocablo «gracias». Veamos por qué.

Imaginemos las primeras bacterias que contenían clorofila y que vivían en una atmósfera reductora carente de oxígeno. Progresivamente, y mediante modificaciones de sus vías bioquímicas, fueron adquiriendo la capacidad de utilizar sustratos cada vez más oxidados hasta llegar al agua, de la que tomaron los electrones y liberaron el oxígeno. Así surgieron estas primitivas cianobacterias. Cuando empezó a liberarse el oxígeno, la feliz circunstancia de la abundancia de hierro reducido en el planeta impidió el aumento inmediato de su nivel en la biosfera, de modo que el altamente tóxico oxígeno fue absorbido por la reacción que convierte el Fe^{++} en Fe^{+++} . Esto se hace evidente en los estratos rojos de óxido férrico. Con ello, todas las criaturas, incluyendo las que lo producían, tuvieron tiempo de generar defensas contra el nuevo veneno. Recuérdese que especialmente bajo condiciones luminosas el oxígeno, en cooperación con la clorofila, puede excitarse a estados muy activos que causan la oxidación indiscriminada de las moléculas fundamentales para la vida: enzimas, ácidos nucleicos, lípidos... La primera línea de defensa la proporcionaron seguramente los carotenoides, los pigmentos que dan el color anaranjado, amarillo y rojo a las zanahorias o a los tomates, y que además tienen la propiedad de desactivar los derivados altamente reactivos del oxígeno o de las clorofilas. El primer microbio que utilizando la luz produjo oxígeno necesitaba alguna defensa contra su propio veneno. Probablemente ya había inventado alguno de esos carotenoides como pigmento accesorio de la fotosíntesis para absorber la luz de longitud de onda entre 450 y 550 nm y

transferirla a la clorofila, ampliando por tanto la antena de recepción luminosa a una más amplia banda de longitudes de onda. Seguramente se vio sorprendido, y muy favorablemente, al hallarse inmune a su propio veneno. Posiblemente las criaturas sin carotenoides desaparecieron al intentar desarrollar la fotosíntesis productora de oxígeno, y las bacterias que por sí mismos no liberaban oxígeno tuvieron que adquirir carotenoides para sobrevivir al que generaban sus vecinos.

Una segunda invención defensiva ante el oxígeno fue la aparición de la respiración: se modificó el metabolismo de forma que los electrones de los compuestos orgánicos o inorgánicos se transferían al oxígeno como aceptor terminal de electrones, con lo que éste era reducido a agua. Así, no sólo toleraban el oxígeno, sino que obtenían energía de la combustión de los sustratos. Algunos organismos abandonaron la fotosíntesis tras inventar la respiración. Hoy en día hay microorganismos que pueden desarrollar ambos procesos, fotosíntesis y respiración, según la disposición de luz y oxígeno: otros pueden vivir por respiración o por fermentación anaeróbica, y existen incluso otros que permanecen intolerantes al oxígeno y deben vivir por fotosíntesis anoxigénica, o por fermentación, o por ambos procesos.

Otra vía de defensa la constituyen los sistemas enzimáticos del tipo de la superoxidismutasa, las catalasas, las peroxidasas, etc., que también desactivan los productos activos del oxígeno.

Hasta hace dos mil millones de años no se oxidó el hierro reducido del planeta. Entonces empezó a aumentar el nivel de oxígeno en tierras y mares, alcanzando el actual hace algo menos de mil millones de años. Parte de este oxígeno se convirtió en ozono por acción de los rayos ultravioletas, formando una capa difusa en la estratosfera que absorbe la mayor parte de la radiación de longitud de onda inferior a los 290 nm (ultravioleta), la más dañina para la vida, porque es absorbida intensamente por los ácidos nucleicos —produciendo mutaciones— y las proteínas. Con ello, lo que originariamente fuera un veneno hizo posible que la vida abandonara los océanos, colonizara la tierra firme y se multiplicase y diversificase de forma explosiva.

Sí, aunque parezca sorprendente, el oxígeno, ese gas tan necesario para nuestra vida, que muy a menudo nos hace exclamar «necesito oxigenarme, necesito ir al campo...», fue originariamente un tóxico, aún lo es para algunos organismos y puede serlo para todos en determinadas circunstancias.

3.1.8.3. *¿Es tóxico el oxígeno?*

El oxígeno es esencial para la vida de los organismos aerobios. Sin embargo, aunque se ha divulgado poco, se sabe desde hace tiempo que les es negativo en concentraciones superiores a las normales en el aire. De hecho, desde la aparición del oxígeno en la Tierra los organismos han estado expuestos a la amenaza creciente de este poderoso oxidante.

Mientras que los demás gases atmosféricos mayoritarios, el nitrógeno y el dióxido de carbono, son fijados por pocos sistemas enzimáticos, el oxígeno es incorporado por los seres vivos mediante un amplio abanico de mecanismos enzimáticos, químicos y físicos. Esta diversidad se explica por su configuración electrónica, con dos electrones no apareados y de espines paralelos. Como consecuencia, cuando este gas reacciona tiende a reducirse de forma univalente formando radicales —como el superóxido, el hidroxilo u otros orgánicos peroxidados— y peróxido de hidrógeno y a adquirir estados de alta excitación electrónica —como el oxígeno singulete—. Estas sustancias, las más reactivas de los sistemas biológicos, van asociadas a la peroxidación de lípidos de membrana, a la oxidación de ácidos nucleicos, a la decoloración de pigmentos fotosintéticos, a la inactivación de enzimas, etc., y en definitiva a la destrucción celular.

Todos los organismos aerobios examinados presentan defensas celulares que les protegen de la reactividad del oxígeno y sus productos activos, constituidas por enzimas, como la superoxidodismutasa, peroxidasas, catalasas, etc., y por otras moléculas, como el glutatión, el ácido ascórbico, los carotenos, la vitamina E, etcétera, que los desactivan.

Estas defensas pueden ser, sin embargo, superadas por concentraciones de oxígeno sólo ligeramente superiores a las atmosféricas, que desencadenan entonces toda la serie de procesos degenerativos mencionados.

En las plantas

Estos procesos parecen tener lugar en las cavidades aéreas de las plantas acuáticas superiores (PEÑUELAS, 1987 b), en las que la presión parcial del oxígeno aumenta linealmente con la profundidad, desencadenando los mencionados efectos negativos. Ello ha impedido que estas plantas colonizaran las aguas profundas, dejando libre el nicho ecológico a las plantas acuáticas inferiores, briófitos y algas, que carecen de espacios aéreos (véase 3.1.3.4). Este efecto del exceso de oxígeno es especialmente importante por tratarse de vegetales, en los que no sólo ejerce la acción tóxica señalada sino que también interfiere en las vías metabólicas, inhibiendo la fotosíntesis y actuando algunas cadenas respiratorias. Los cloroplastos están especialmente sometidos al efecto del oxígeno a causa de las altas concentraciones internas durante la fotosíntesis, proceso del que este gas es producto.

Envejecimiento, cáncer, lluvia acida...

A la luz de estas consideraciones, aparecen otros fenómenos explicables por el efecto negativo del exceso de oxígeno. Así se haría comprensible la ausencia de espacios aéreos en los haces vasculares de las plantas, pues, de existir, sufrirían elevadas presiones parciales de oxígeno generadas por las altas presiones, tanto positivas como negativas, que mueven la savia. También puede ser ésta la causa de la ausencia de cianobacterias vacuolados en las aguas profundas bien oxigenadas.

Hay probadas evidencias de que otros muchos procesos naturales son consecuencia de la acción del oxígeno y sus especies activas (PEÑUELAS, 1985 a).

En la maduración de los frutos, la rotura de membranas y paredes celulares se debe aparentemente a la progresiva retirada de los sistemas defensivos señalados. Lo mismo parece

ocurrir en procesos tan dispares como el envejecimiento de las plantas (C. Sagan ha escrito una novela de ciencia ficción, *Contacto*, basada en el envejecimiento por el oxígeno) y la enfermedad ocular de cataratas.

Los estados celulares prooxidantes, es decir, las altas concentraciones de especies activas, que pueden ser causados por diferentes clases de agentes tales como elevadas presiones de oxígeno o excesos de radiación, pueden provocar, también, crecimientos celulares neoplásicos, tumores. De hecho, se ha comprobado que muchos antioxidantes son anticarcinógenos.

El efecto tóxico de la «lluvia acida» puede estar también más relacionado con los fenómenos de oxidación y formación de especies activas del oxígeno que dañan la clorofila, que con la acidez en sí. Recuérdese, además, que oxidantes y ácidos están estrechamente ligados. En efecto, en los árboles dañados se produce per- oxidación lipídica en las membranas de las células foliares.

La biofotogénesis, o producción de luz por los seres vivos, se puede entender como un mecanismo de destoxificación del exceso de oxígeno que algunos organismos han desarrollado para adaptarse a las concentraciones crecientes de este gas a lo largo de la evolución.

Pero no todo es negativo en el exceso de oxígeno y sus especies activas. En muchos casos, éstas son utilizadas positivamente por los organismos. Así ocurre en los mecanismos de defensa ante infecciones y parásitos, en los que se encuentran enormes similitudes entre las posibles funciones antibióticas de las peroxidasas de las paredes celulares vegetales y la activación oxidativa de las células fagocitarias animales. Las especies activas del oxígeno son también la base de la acción enzimática contra compuestos difícilmente biodegradables, como los organoclorados (DDT) o la lignina (véase 6.3). Y nosotros mismos utilizamos el agua oxigenada para desinfectar nuestras heridas.

La acción del oxígeno y sus productos activos, como sucede en la mayoría de las cuestiones que trata la ecología, es general en todo el mundo viviente, tanto en organismos procarionotas como en vegetales y animales, todos ellos fruto de una

evolución que en sus comienzos tuvo lugar en ambientes anóxicos.

Muchos millones de años después, las condiciones que habían erradicado a los primeros organismos —anaerobios— de la superficie, empezaron a transformarse poco a poco, y hoy en día estos organismos han regresado de su destierro, ocupando el más seguro y cómodo de los ambientes, el tubo digestivo de los animales, desde el de los mosquitos hasta el de los elefantes, donde llevan una existencia regalada, rodeados de alimentos. Lovelock y Margulis opinan que constituyen unos de los aspectos más importantes de Gaia, y que bien podría ser que los grandes mamíferos, especie humana incluida, sirvieran sobre todo para proporcionales un entorno anaerobio. Contemplada desde esta óptica, ¿qué humilde resulta nuestra condición, la humana: una simple choza para los microorganismos anaerobios!

3.2. LAS COMUNIDADES. ECOLOGÍA DEMOGRÁFICA

El trasiego de materia y energía a través de los ecosistemas se manifiesta también en el nacimiento, crecimiento, reproducción y muerte de los individuos, en la organización o información, como la denominan muchos ecólogos (MARGALEF, 1987). La vida, como ya hemos visto, es un continuo, se halla dividida en individuos, en unidades, números enteros que facilitan el estudio demográfico de las poblaciones, colectivos definidos arbitrariamente en el tiempo y en el espacio. Tal como la demografía ha hecho con las poblaciones humanas, se pueden estudiar las poblaciones animales e incluso las vegetales.

3.2.1. Las tablas de vida

Los datos de los censos de población se presentan de forma estandarizada en tablas de vida. La idea surgió del uso que de ellas hacían las compañías de seguros; el trabajo de los demógrafos de la sociedad humana fue después utilizado por los demógrafos zoólogos. Los problemas son algo distintos, pues dichas tablas deben ser construidas a partir de datos diferentes.

El número de los distintos animales es contado sobre submuestras o por captura, marca y recaptura, pero su edad al morir puede ser difícil de medir.

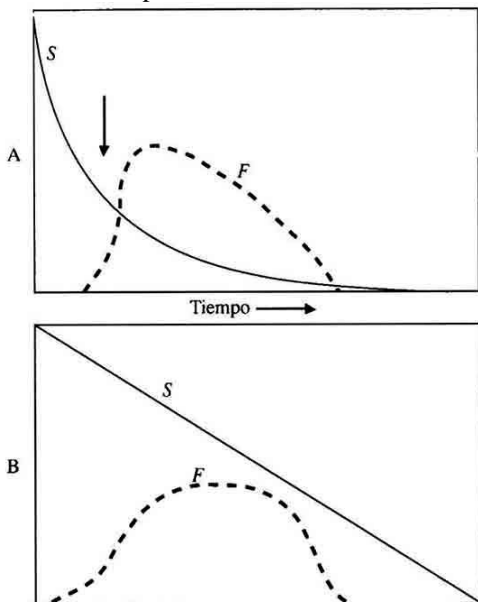
Generalmente los datos más útiles para el ecólogo son los que conciernen a la supervivencia. Un tipo extremo de curva es el de la población humana con una alta esperanza de vida y con una mortalidad acelerada a edades altas. El otro extremo es el de una intensa mortalidad de los jóvenes, seguida de una larga supervivencia de algunos de los que no cayeron, como en el caso de los percebes o las estrellas de mar, cuyas larvas sufren muertes en masa. Entre ambos extremos se hallan las curvas de mortalidad constante, como las de las ardillas o las hidras (fig. 32).

Las tablas de vida pueden ser una eficaz herramienta en la gestión de las poblaciones salvajes, porque muestran qué clases de edad pueden ser recolectadas o cazadas sin serias consecuencias para la población. Esto se puede aplicar, por ejemplo, a las poblaciones de focas —famosas gracias, entre otros factores, al decidido apoyo de Brigitte Bardot—, pues en relación con ellas las tablas de vida sugieren que el mantenimiento de las poblaciones requiere la protección de las hembras durante los tres primeros años de vida. Tienen estas tablas el inconveniente de que no permiten calcular la tasa de crecimiento, r , pero en cambio suministran información sobre los peligros naturales a que se enfrenta una especie y acerca de las estrategias desarrolladas para solventarlos. Por ejemplo, las ovejas y los ratones de montaña mueren bajo los ataques de los lobos sólo cuando son muy jóvenes o muy viejos, a menos que se hallen enfermos. En cambio, las ardillas suelen sufrir mortalidad moderada, pero constante, a lo largo de toda su vida.

3.2.2. Estrategias de vida

Hay diferentes estrategias de adecuación al nicho. Las especies colonizadoras se multiplican y dispersan rápidamente como las «malas hierbas». Son las especies oportunistas, también llamadas, después de los trabajos de MacArthur, estrate-

gas de la r porque su éxito se basa en una gran tasa de multiplicación (r), y fugitivas, puesto que no están bien adaptadas a la competencia y responden a su presión emigrando. La estrategia opuesta es la de las especies estrategas de la k (k es el límite superior de la población), cuyo éxito se basa en la persistencia de la máxima biomasa y cuyas poblaciones son controladas por la densidad, al contrario que en el caso de las oportunistas, independientes de la densidad. Entre ambos extremos existe un continuo de posibilidades.



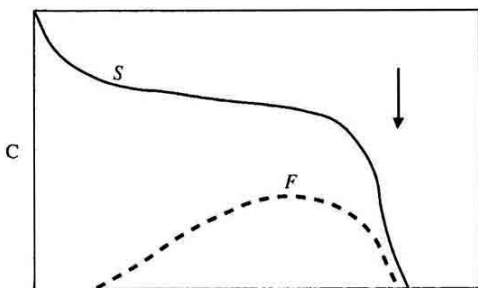


Fig. 32. Curvas de supervivencia (S) y curvas de fecundidad (F) por edades para tres especies ideales: A. especie estratega de la r , de un ecosistema de baja madurez o de un nivel trófico inferior: B. especie intermedia, y C. especie estratega de la k : o de un ecosistema más maduro. Las flechas indican las edades en que la selección natural es más intensa. (Modificado de MARGALEF, 1978 y ODUM, 1983.)

Para las especies que consiguen equilibrios poblacionales duraderos, una minoría, el mecanismo decisivo que rige la población es la competencia por los nichos vacantes. Las especies de corta vida y oportunistas, a los que sufren una fuerte presión depredadora, pueden persistir con poblaciones locales constantemente fluctuantes. También algunas de las especies animales y vegetales de larga vida, de estrategia k , viven en poblaciones que están siempre cambiando muy lentamente y que puede que no alcancen el equilibrio ni la extinción antes del cambio climático o ambiental.

El árbitro último de la población de cualquier especie es su propio ciclo vital adaptado a sus particulares tipos de recursos.

3.2.3. Las poblaciones y su limitación

3.2.3.1. La competencia y los factores abióticos

Las poblaciones tienen pautas de aumento características. Existen dos tipos básicos en la forma de la curva de crecimiento representarla aritméticamente: el crecimiento en forma de J (fig. 2), aumento exponencial y detención brusca ($dN/dt = rN$ con un límite definido de N), y el crecimiento en forma de S o

crecimiento sigmoideo (fig. 1), al principio lento, después rápido y de forma exponencial, para disminuir finalmente hasta que se alcanza y mantiene el equilibrio. Este último se puede explicar mediante la hipótesis de que la competencia aumenta con el incremento de la población. La expresión matemática es la ecuación logística $dN/dt = rN (1 - N/K)$. La ecuación logística incorpora la capacidad intrínseca de crecimiento de la población y las limitaciones impuestas por el ambiente, y puede también ser modificada para incorporar la competencia interespecífica. Esta hipótesis puede ser analizada en el laboratorio con poblaciones monoespecíficas de animales sencillos, como los paramecios o las moscas, en que se puede demostrar la competencia por el alimento y por el espacio. Cuando se aplica a especies distintas en confinamiento, la competencia lleva a la total extinción de una de las especies. Es el principio, varias veces probado, de la exclusión competitiva, más conocido como «una especie, un nicho». Consecuentemente, las poblaciones naturales se suelen hallar bajo un control que depende de la densidad, y las especies se mantienen distintas por la eliminación selectiva de los individuos que tienden a competir con los de otras especies.

Tanto la idea del equilibrio de la población como la de la preservación de las especies separadas por la selección natural invocan el concepto de competencia.

La competencia es quizá el fenómeno más controvertido de la ecología. De lo que no hay duda es de que se trata de una potente fuerza ecológica y evolutiva. Existe competencia cuando el uso de un recurso (comida, agua, luz, espacio...) por un organismo reduce su disponibilidad para los demás. La competencia puede ser intraespecífica o interespecífica. Los experimentos de laboratorio demuestran que dos especies no pueden coexistir si requieren recursos similares. Pero en el campo, la competencia puede ser más débil, que está enmascarada por la existencia de muchos más factores incontrolados experimentalmente.

Los ecólogos han discutido largo y tendido sobre la importancia real de la competencia en la regulación de la densidad de las poblaciones naturales. Para algunos, el hecho de que la

hipótesis logística explicase la exclusión competitiva y la distinción de las especies es una buena razón para esperar que la competencia y la dependencia de la densidad sean ubicuas. Esta idea se vio reforzada por los censos de poblaciones de aves en la primavera de las latitudes templadas, con números constantes de año en año, mostrando casi como innegable el control dependiente de la densidad. Era difícil, sin embargo, mostrar cómo actuaba realmente la mortalidad dependiente de la densidad en las aves durante los inviernos, y más tarde se cayó en la cuenta de que la constancia en el censo primaveral era más una consecuencia del comportamiento territorial que de la muerte invernal. Para los ecólogos que estudiaban insectos resultaba aún menos satisfactoria. Las poblaciones de insectos fluctúan ampliamente, especialmente en los hábitats temporales y marginales, pues mueren en masa cuando cambian las condiciones climáticas. La competencia y la densidad son generalmente poco importantes en el caso de los insectos, y se puede hablar de un control por el clima, independiente de la densidad.

Tras mucho debate parece ahora aceptarse que las diferentes poblaciones son controladas de diferente manera, en función las circunstancias locales y de la historia de su vida. La coexistencia es especialmente inhibida en las poblaciones numerosas, pero puede ser viable cuando múltiples o diversas causas aleatorias mantienen los números bajos. No hay, pues, un único mecanismo causante del control de las poblaciones naturales. Algunas poblaciones pueden permanecer a veces cercanas al equilibrio, con una compensación entre los nacimientos y las muertes, pero más a menudo los números fluctúan entre amplios márgenes. Las posibles causas de muerte varían de especie a especie y de época a época. Los fallos de nacimientos o de apareamiento son tan importantes y efectivos como la muerte. Las tasas de nacimiento varían, en algunas especies, incluso por pautas de comportamiento que las regulan de acuerdo con la disponibilidad de recursos. Esta regulación, sin embargo, aumenta la tasa de supervivencia de la prole, es decir, trabaja siempre para aumentar la tasa de crecimiento de la población. Parece que la mayoría de los ecólogos están

de acuerdo en esto y en que todo control de las poblaciones ocurre por alguna forma de resistencia ambiental.

Los continentes siempre están verdes

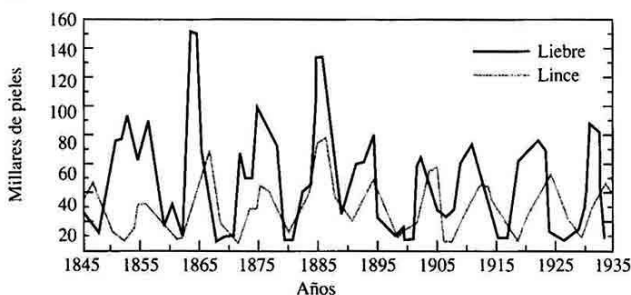
En este sentido, ha surgido una cuestión secundaria: si las poblaciones de los insectos, y de los herbívoros en general, en realidad no están limitadas por la comida, puesto que la tierra siempre está verde, siempre tiene vegetación. Este verdor es consecuencia de la gran cantidad de energía de que disponen las plantas, con la que compensan fácilmente la masa ingerida por los herbívoros, y también de la eficiencia de las defensas contra el ataque de los mismos; no necesariamente consecuencia de la restricción de estos herbívoros por el clima o por sus depredadores. Las plantas no están limitadas energéticamente, pero sí lo están por el espacio. Cuando una es cortada deja espacio para que se desarrolle otra, quizá de otra especie. Los herbívoros como nivel trófico global no pueden producir un flujo de energía suficiente para reducir sensiblemente la cubierta vegetal.

3.2.3.2. La depredación

Mientras que la competencia es un fenómeno que tiene lugar entre organismos de un mismo nivel trófico, la depredación es un fenómeno que ocurre entre niveles tróficos diferentes. Mientras que en el sistema depredador-presa se producen oscilaciones, pero no desaparece ninguna de las dos especies, en el caso de la competencia no siempre se produce una situación de equilibrio y se puede llegar a la desaparición de una de las dos especies. Por ello, cuando especies similares coexisten, utilizan diferentes recursos. La depredación es la otra gran fuerza selectiva que moldea las estrategias de las especies e impone orden y estructura en las comunidades. Sin embargo, muchas ideas sobre la depredación han venido siendo influidas por diversos errores. Por ejemplo, no existe una evidencia válida de que las altas poblaciones de ciervos americanos fuesen una consecuencia de la caza de lobos y pumas (CAUGHLEY, 1979).

El sistema depredador-presa puede explicarse de un modo sencillo y simplificador y ser objeto de modelado matemático. Las ecuaciones diferenciales más simples predicen oscilaciones acolladas en las poblaciones del depredador y de la presa (fig. 33). Sin embargo, ello no se consigue en el laboratorio, a menos que se le dé a la presa la oportunidad de esconderse o de alejarse de la concentración de depredadores cuando la población de éstos es alta; de otro modo, la presa es exterminada. Se han descrito oscilaciones no acopladas en la naturaleza. La dispersión de la presa fuera de la concentración del depredador se ve favorecida en los ambientes bien estructurados. También existen muestras de que muchos pequeños herbívoros han evolucionado de modo que han desarrollado eficaces mecanismos de defensa que sólo los hacen accesibles a los depredadores cuando están enfermos o son viejos.

A



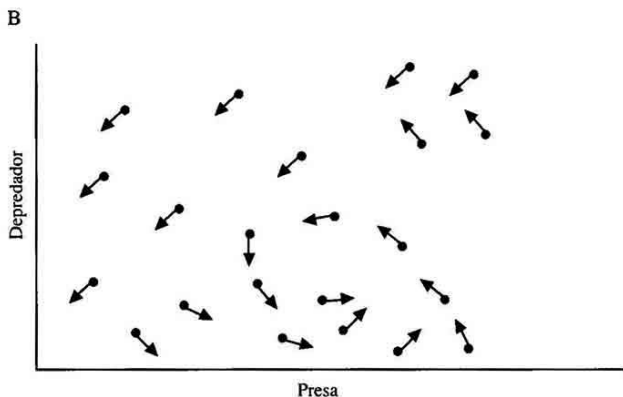


Fig. 33. A) Ciclos en la densidad de las poblaciones de liebres y linces, censadas indirectamente a través de las capturas que sostenían la industria peletera del Canadá. (Según MACLULICK, 1937.) En los últimos años se está discutiendo la posibilidad de que estos ciclos acoplados no sean más que un artefacto. B) Representación generalizada de la tendencia al cambio en un sistema formado por depredador y presa, por medio de vectores que convergen en una región restringida de ciclos. (Según MACARTHUR y CONNELL, 1966.)

La importancia de la depredación como reguladora de las poblaciones depende de ciertas propiedades de la presa, especialmente su fiabilidad para escapar a la detección, su habilidad para defenderse, y las densidades y la dispersión que puede alcanzar en ausencia del depredador; asimismo depende de algunas propiedades del depredador, como su capacidad de ataque, su fecundidad y su respuesta funcional. La depredación tiene importantes consecuencias cuando las poblaciones posibles de la presa en ausencia del depredador son grandes, cuando la presa se dispersa uniformemente y cuando su capacidad defensiva es baja.

La relación entre el depredador y la presa se estructura de acuerdo con sus tamaños relativos. A medida que aumenta el tamaño de la presa con respecto al del depredador se hace más difícil la captura, hasta llegar, en el límite, a casi imposibilitarla; así, los leones no cazan elefantes adultos. Algunas especies, como los lobos, las hienas o las hormigas, aumentan el

rango de tamaño de sus presas por su comportamiento cooperativo social.

El poder «asesino» de muchos depredadores pequeños como las arañas o las avispas, puede ser tan grande, que en algunas circunstancias pueden actuar como los depredadores ideales de los modelos matemáticos sencillos, hecho que puede estar detrás del éxito del control biológico.

Los parásitos

En el extremo inferior de tamaño relativo se hallan los depredadores internos o parásitos, con una estrategia muy distinta, porque dependen de que se mantenga vivo el huésped y no pueden ser demasiado grandes para no eliminarlo rápidamente. Los externos también deben ser pequeños, para no ser advertidos ni eliminados fácilmente. Según este criterio, la mayor parte de los herbívoros podrían ser considerados como parásitos, porque la planta suele seguir viviendo.

La especificidad del huésped y los complejos ciclos de vida que facilitan la dispersión son característicos de muchos parásitos.

Adaptaciones

Las adaptaciones de los depredadores demuestran la importancia del ambiente biótico como agente de la selección natural. Así, el tipo de alimento condiciona los sistemas digestivos y excretorios y otras funciones. No hay más que fijarse en sus aparatos de filtración, dientes, patas delanteras, órganos sensoriales, etcétera.

Para escapar de la depredación, la presa puede esconderse, huir o luchar. Las estrategias defensivas son costosas, porque requieren tiempo, energía y materiales que son limitados. Los animales crípticos (disimulados) son una muestra de la complejidad de las adaptaciones antidepredatorias. También las plantas han desarrollado defensas estructurales y químicas contra los herbívoros. Todas estas adaptaciones ponen de manifiesto la importancia de la coevolución (véase 4.3).

3.2.4. Ecología de los sistemas sociales. Grupo *versus* individuo

Los individuos viven junto a los de su propia clase, a menudo apareados por sexos, a veces organizados en complicadas jerarquías sociales, a veces en densos agregados como manadas o bancos y a veces espaciados de forma que se puede hablar de especies territoriales. ¿De qué les sirve el grupo a los individuos? ¿Existe selección de grupo o de individuo?

p Las modalidades de comportamiento gregario en grupo pueden ser plenamente explicadas como resultado de las ventajas que cada individuo obtiene del grupo. Entre las principales se cuentan la cooperación en la búsqueda de alimento y la defensa ante los depredadores. Lo podemos advertir con facilidad cuando observamos una tribu humana primitiva o una de mandriles. El valor adaptativo de la asociación íntima en grupos puede dar lugar a la I evolución de la atracción mutua entre individuos y a la de las adaptaciones sociales. El comportamiento, la cooperación y la especialización pueden producir como resultado una elaborada organización social en la que Inexistencia de jerarquías reduce las agresiones en el seno del grupo.

Se da algún caso, en sistemas de poblaciones panmícticas .Icon cruzamiento general y aleatorio y estructuradas en subpoblaciones aisladas, en que las funciones comunales pueden ser preservadas por una forma estrechamente constreñida de selección de grupo. Sin embargo, que el comportamiento social reporte algunas veces ventajas a las poblaciones o grupos enteros no implica que haya una selección de grupo.

3.2.4.1. *El sexo. ¿Por qué? ¿Quién necesita los machos?*

Estudiemos con algo más de detalle la primera agrupación, el apareamiento por sexos.

La mayoría de las especies vivientes han desarrollado dos sexos, y sólo los miembros de uno de éstos ponen huevos. En principio, la ventaja de la existencia de sexo no es obvia, especialmente en los animales y desde el punto de vista de la hembra. Con el sexo debe sufragar el coste de la meiosis, el de la recombinación y el del apareamiento (energía, atenciones se-

xuales no deseadas, depredación, transmisión de enfermedades, heridas y daños causados por el macho...). El esperma es poca cosa más que ADN con cola transportadora. Son las hembras las que proveen el nutrimento esencial para el crecimiento larvario o embrional ¿Por qué el macho? ¿Por qué el sexo?

Seguro que el lector recuerda ahora lo que alguna vez ha escuchado o leído: si todos los descendientes fueran xerocopias de la madre no habría variación genética y la selección no podría operar efectivamente. La vieja explicación sitúa la ventaja del sexo en la producción de nuevas variedades que puedan enfrentarse a las condiciones cambiantes. Pero para ser plausible, la ventaja tiene que ser inmediata. Cuando una hembra es muy fecunda, normalmente sólo una parte de su esfuerzo reproductivo sobrevivirá y sólo unos pocos de los supervivientes tendrán éxito después de competir entre sí y con los descendientes de otras hembras. La oportunidad de que sus crías tengan éxito será mayor si puede producir individuos sutilmente diferentes entre sí (fig. 34). WILLIAMS (1975) lo compara al juego de la lotería, indicando que es mejor participar en el mismo con muchos boletos diferentes que hacerlo todas las veces con el mismo número. De esta manera el sexo puede ser considerado como un mecanismo útil para las hembras altamente fecundas, pues los beneficios de este mecanismo superan en mucho a los costes de compartir la mitad del material genético en cada huevo.

Se entiende peor la razón de la existencia del sexo en los animales de baja fecundidad, como los pájaros y los mamíferos, pues los altos costes que comporta producir y mantener los machos para una pequeña progenie parecen difícilmente justificables. Puede que la variedad en estas especies sea particularmente necesaria para enfrentarse a la competencia intraespecífica.

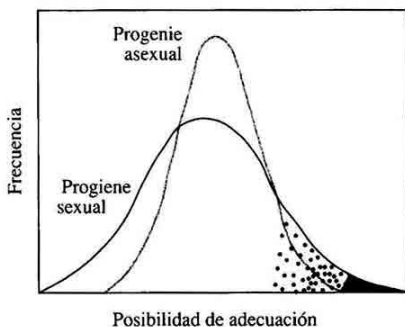


Fig. 34. Modelo de las ventajas y desventajas del sexo según WILLIAMS (1975). El sexo produce una progenie con menor posibilidad media de adecuación al hábitat, pero también una mayor frecuencia de vástagos con posibilidades muy altas de adecuación. El sexo resultará ventajoso si se da suficiente progenie para que exista una alta probabilidad de que se produzcan algunos descendientes con muy alta posibilidad de adecuación al medio. Si no es así, la reproducción asexual es más ventajosa.

Los animales partenogenéticos (los que se reproducen sin fertilización sexual) son por lo general sólo modestamente fecundos y viven donde el crecimiento rápido de la población es posible durante unas generaciones. La reproducción asexual dobla la fecundidad en estos períodos de rápido crecimiento. El sexo no reporta entonces ningún beneficio y es aplazado hasta que alguna generación se enfrenta a un exceso de población o cambia alguna circunstancia física; entonces la secuencia partenogenética es interrumpida por un episodio sexual. En los vegetales se puede apreciar algo parecido. Es muy claro el caso de las diatomeas, algas con dos valvas, una superior, mayor, y otra inferior, menor, contenida en la primera. Cuando se dividen asexualmente, cada valva se convierte en la superior, y por tanto en la mayor, de la diatomea hija. Se comprende que las diatomeas resultantes de las valvas menores serán progresivamente más pequeñas hasta hacer imprescindible una reproducción sexual a fin de no desaparecer. Desde el punto de vista genético egoísta existen ventajas obvias en la partenogénesis. La ventaja sexual debe de ser consecuencia de la variabilidad genética. Pero, aun así, si su única función es contribuir con su

ADN, no se entiende el motivo de invertir tanto esfuerzo en construir machos.

Estas incógnitas parecen tener la respuesta en el hecho de que la evolución no trabaja para el bien de los grupos o de las especies.

Como sostiene Darwin, la selección natural, el motor de la evolución, es fundamentalmente una lucha entre individuos para pasar la mayor parte de sus genes a generaciones futuras. Los machos devienen agentes evolucionarios por propio derecho, no para el beneficio de la especie. Entran en la lucha para copular y necesitan por lo tanto un buen tamaño. También cuidan de la prole en los sistemas sociales más complejos. En algunas ocasiones, en las que no realizan estas funciones, se simplifican enormemente. Es famosa la imagen divulgada por Gould de la hembra del pez *Ceratias holbolli*, la cual lleva pegado a su cuerpo un pequeñísimo macho que parece una cría con órganos reducidos, aunque no totalmente; aún tiene corazón, sistemas respiratorio y excretor propios y unos enormes testículos. Estos peces representan la expresión extrema de una característica común de la naturaleza: machos más pequeños que las hembras, en consonancia con su papel de fuentes de esperma. Y quién sabe si esa vida no es la que desean todos los machos: un pene, un corazón y una hembra solícita y cariñosa —ironiza Gould.

MARGULIS y SAGAN (1986) introducen nuevas ideas sobre la cuestión del sexo, aunque algunas de ellas no parecen tan plausibles como otras. Rechazan la pregunta de por qué la reproducción sexual no es sustituida por la asexual considerándola cuestión no válida científicamente. En su opinión, para la reproducción o para transmitir información genética de los dos al descendiente, no son necesarios ambos progenitores.

Muchos de los enzimas que median en la recombinación genética de animales y plantas se originaron en los procariotas como enzimas de reparación del ADN. Los eucariotas evolucionaron desde comunidades simbióticas de procariotas. La fusión de células eucariotas similares probablemente evolucionó desde el canibalismo, porque era más rentable almacenar el nuevo ADN que digerirlo. La meiosis surgió para restaurar la

haploidia. Y lo mismo el ciclo haplodiploide consiguiente, haploide en condiciones favorables, diploide en las más duras (ventajas de la complementation de los genes). Para Margulis y Sagan, en la actualidad los organismos superiores tienen que mantener la meiosis porque es una parte necesaria del ciclo vital de la diferenciación celular. El sexo se mantiene porque no existe otra opción, y no porque conlleve alguna ventaja en la generación de variabilidad o aceleración de la evolución. Ésta es, sin embargo, una hipótesis aceptable sólo en parte, porque hay también bastantes puntos oscuros en la exposición de su teoría (SMITH, 1987). El más criticable es la suposición de que la meiosis es necesaria para reiniciar el proceso de desarrollo, pues en muchas plantas superiores las células somáticas pueden dar lugar a nuevos individuos sin pasar por la meiosis, y en muchos animales partenogenéticos ocurre lo mismo. La hipótesis de Margulis y Sagan puede ser aceptada en relación con los grupos en que esto no ocurre.

Castas trabajadoras formadas por hembras

Las proporciones paritarias en el número no se guardan en algunos casos, como en el de los himenópteros sociales, las hormigas o las abejas, que son haplodiploides (los machos sólo tienen n cromosomas, pues proceden de huevos sin fertilizar — es decir, no tienen padres—, mientras que los huevos fertilizados dan lugar a las hembras, que tienen los habituales $2n$ cromosomas.) Éste es un fenómeno importante a escala global por causa del enorme número de especies de himenópteros, más de cien mil cuando todos los vertebrados juntos sumarían unas cincuenta mil. En ellos se da una peculiar asimetría entre los sexos. Las hembras comparten tres cuartas partes de los genes con sus hermanas y sólo una cuarta parte con sus hermanos, una mitad con su madre y una mitad con su descendencia potencial. Si han de cumplir la teoría darwiniana de maximizar la descendencia de sus propios genes en las siguientes generaciones, les sale más a cuenta ayudar a su madre a procrear nuevas hermanas que tener descendencia propia. Ahí puede residir la razón de que las castas trabajadoras estén invariablemente for-

madras por hembras, y quizá por eso los himenópteros han desarrollado repetidamente sistemas sociales en el curso de la evolución del grupo. La relación no es, sin embargo, obligada, pues existen muchos himenópteros no sociales. La haplodiploidia es útil para las especies colonizadoras cuando encuentran una fuente de recursos rica, pues pueden producir nuevas generaciones controlando la proporción de sexos de la descendencia.

Sexo, estructura social y territorialidad

Una consecuencia del sexo es que las hembras invierten mucho más en la progenie que los machos. Esta diferencia es la causa de muchas de las variedades de los sistemas sociales y de apareo. Los machos incrementan su adecuación inseminando muchas hembras, por lo que abunda la poligamia. El tamaño real de un harén, como por supuesto también ocurre en las sociedades humanas, depende de la disponibilidad de recursos y de los intereses opuestos de hembras y machos. La monogamia es el caso extremo con harén de tamaño 1. Ocurre cuando los recursos son escasos, cuando son dispersos, cuando no los puede obtener un macho, cuando las hembras son escasas, o cuando el macho invierte en la progenie el mismo esfuerzo que la hembra. La territorialidad suele ir asociada a ello.

La territorialidad también aparece cuando los machos polígamos compiten entre sí para copular con las hembras. Algunas de las consecuencias son el gran tamaño y los brillantes colores de los machos de algunas especies. Como ya hemos visto, aunque las presiones selectivas dirigirían la evolución hacia la existencia de hembras grandes y dominantes socialmente, en algunos de estos animales familiares y territoriales los machos poligámicos son más grandes y socialmente dominantes. Los complejos mecanismos sociales pueden ser mantenidos sólo por selección natural si tras un encuentro se producen ventajas tanto para el ganador como para el perdedor. En cada caso, para el perdedor debe ser provechoso huir e ir a buscar otra oportunidad en otra parte o en otra época, compensándole de la humillación inmediata y de la pérdida de posibilidades de alimentarse o aparearse.

Una consecuencia de la alimentación territorial es que se establece un límite a la población, debido a que el espacio es limitado. Así se comprueba en la notable constancia del número de aves territoriales de año en año.

Los miembros de una población mantienen una distancia individual frente a los demás. La defensa del territorio representa la extensión de la distancia individual al espacio y a los objetos. En ciertos pájaros es muy conspicua. Su finalidad es de explotación de recursos y reproductiva, hasta el punto de que el comportamiento territorial puede romperse con la existencia de una alta densidad o con una disponibilidad de recursos impredecible. De hecho, la extensión del territorio está relacionada con el papel que desempeña en la provisión de recursos.

IV. EL TIEMPO

4.1. EL ECOSISTEMA EN EL TIEMPO. LA SUCESIÓN

El dinamismo del ecosistema se puede estudiar considerándolo, bien como un flujo de materia y energía, bien como una sucesión de nacimientos y muertes de individuos, pues ambos aspectos son complementarios. La organización del ecosistema es abierta y heterogénea, y está sometida a Innumerables alteraciones no previstas desde el interior de la propia organización. Por ello, los cambios resultantes en el transcurso del tiempo unen lo aleatorio y lo determinado. El proceso autoorganizativo es perturbado casi continuamente por sucesos imprevisibles. Los cambios pueden ser cíclicos, o más o menos regularmente rítmicos, o irreversibles. De todas formas, las tendencias derivadas de la propia organización se manifiestan continuamente, y por su constancia destacan sobre los cambios. La sucesión resultante es en ecología algo parecido a la evolución en biología general.

Cuando un campo deja de ser cultivado o cuando se sumerge una losa en el mar —ahora los periódicos y la televisión llaman a esto sumergir o crear un biotopo— se empiezan a poblar de plantas y animales hasta que se forma la comunidad propia del país. Se suceden poblaciones de diversas especies, primero rápidamente, después de manera más lenta, y generalmente aumenta la diversidad de especies. La colonización sigue hasta el punto en que la respiración del conjunto de la biomasa iguala a la producción primaria. Después, el ecosistema varía poco, mientras no varíe el entorno. A esta secuencia histórica, repetida y repetible, se la denomina sucesión. Un ejemplo típico lo constituyen los cambios que se producen al formarse un bosque a partir de rocas desnudas pasando por las poblaciones de bacterias, de líquenes, de musgos, de hierbas y de arbustos.

El establecimiento y desarrollo de comunidades vegetales en hábitats nuevos, previamente carentes de plantas, como dunas, rocas desnudas por la erosión, lavas, recesión de glaciares, etc., se denomina sucesión primaria. El retorno de un área a su vegetación natural después de una perturbación se llama sucesión secundaria. La sucesión resulta de las variaciones en la habilidad de las plantas para colonizar hábitats perturbados y de los cambios producidos en el ambiente como consecuencia del establecimiento de las nuevas especies.

Los mecanismos de la sucesión son complejos. Considerado de forma esquemática, se trata de un proceso unidireccional: primero colonizan las especies oportunistas, de gran facilidad de dispersión y rápida multiplicación; después, y poco a poco, van apareciendo especies de crecimiento más lento pero más resistentes, más organizadoras. Existen además otras regularidades manifiestas: aumenta la biomasa total y principalmente las porciones menos activas; aumenta, aunque menos, la producción primaria; disminuye la relación entre la producción primaria y la biomasa total, es decir, se retarda la tasa de renovación (*turnover*) del conjunto del ecosistema; disminuye la concentración total de pigmentos asimiladores, y de la clorofila *a* más de los otros, en los productores primarios; se reduce el tiempo de permanencia de los elementos biogénicos fuera de los organismos (recuérdese lo mencionado con respecto a los bosques tropicales); se regula el sistema de transporte en el sentido de un mayor determinismo condicionado por un aumento de la estabilidad ambiental; la estructura de las comunidades se complica y se da mayor segregación entre especies próximas, y se desarrolla toda clase de mecanismos de homeostasis. El límite de madurez del ecosistema puede ser definido como el estado con máxima biomasa en que la producción es igualada por la respiración. Después de que esto ocurra, continúan algunas reconstrucciones hasta que el clima no permite una mayor complicación de la organización. Esta etapa final se denomina clímax, culminación de la gradación, y raramente se llega a ella, pues existen muchas causas de retroceso: incendios, cambios climáticos, inundaciones, sequías... A mayor escala, no han faltado glaciaciones, erupciones volcánicas y sobre todo la

deriva de las placas continentales, que garantizan cambios y evolución continua. En las aguas los procesos son aún más rápidos.

El tiempo requerido por la sucesión para pasar del hábitat desnudo a la comunidad clímax varía con la naturaleza de ésta y la calidad inicial del suelo: viene determinado por las condiciones locales, entre ellas la disponibilidad de nutrientes, la humedad, la pendiente y la exposición, e incluso el fuego, que puede llegar a ser necesario en el ciclo vital de algunas especies de plantas, como ciertos pinos, para dispersar sus semillas. También el pastoreo puede modificarlo. Los clímax cíclicos y transitorios se desarrollan donde las condiciones son inestables, como en los charcos de agua estacionales. La sucesión se establece cada vez que aparece una nueva oportunidad ambiental.

A lo largo de la sucesión varían las características de la especie dominante. Las especies de la comunidad clímax se dispersan y crecen más lentamente, pero la tolerancia a la sombra en sus estadios iniciales de germinación y su gran tamaño cuando alcanzan el estadio de plantas adultas les confiere ventaja competitiva con respecto a las especies iniciales.

Muchos de los estadios secuenciales en el tiempo pueden encontrarse también a lo largo de gradientes geográficos de vegetación, a menudo llamados ecoclinas.

Los cambios continuos son lentos en el sentido de la sucesión y abruptos, regresivos y simplificadores tras un desastre o tras alteraciones procedentes del exterior del ecosistema, más imprevisibles y no tan comunes.

También en este caso se puede establecer una similitud con fenómenos sociales, tales como el establecimiento de una burocracia" que acaba tendiendo sólo a su propia conservación, hasta que se produce un cambio brusco, una revolución. Tras ella, de nuevo se establece una burocracia, y así sucesivamente.

La explotación detiene la sucesión. Si el objetivo es el clímax, la explotación y la conservación son incompatibles (véase el cap. 5).

4.2. LOS RITMOS

Una de las características más sobresalientes de la vida es, pues, su cambio continuo. Algunos cambios son rítmicos y se ajustan al ciclo diario, al estacional o al anual. En otras ocasiones, varían con los cambios climáticos, como los períodos de sequía o humedad, o con cualquier otro accidente.

A menudo los organismos aprenden un ritmo y así se anticipan a los acontecimientos. Esto es lo que hacen las aves migratorias o los árboles caducifolios, que preparan las hojas mucho antes de la primavera, unos siguiendo las horas de luz, otros —más fácilmente engañables—, la temperatura. También se adaptan a los cambios en el nivel del agua marina algunas plantas microscópicas que se hunden en el fango antes de que suba la marea. Algunos gusanos marinos sincronizan su reproducción en una o dos lunaciones anuales, cosa que aprovechan ciertos nativos para pescarlos cuando están llenos de células reproductoras, nutritivas y sabrosas (el «palolo» del Mediterráneo, por ejemplo). Muchos organismos permanecen aletargados, con un descenso de su actividad metabólica y de su temperatura corporal, en los períodos extremadamente desfavorables, unos por incapacidad fisiológica, los ectotermos, otros por falta de alimento, los endotermos (por ejemplo, los osos). En su anticipación a los cambios ambientales, los organismos almacenan recursos, como agua (cactus), grasas (animales árticos) o frutos escondidos (ardillas), para moderar los efectos de las fluctuaciones ambientales o prever el gasto de largas migraciones (aves) o períodos de reproducción.

4.2.1. Un ejemplo en nuestras costas: el ritmo nictemeral de los crustáceos misidáceos en las cuevas de las islas Medes

Los crustáceos misidáceos resultan realmente sobresalientes en las cuevas submarinas del Mediterráneo, tanto por su enorme número como por su comportamiento migratorio. Durante el día se esconden en la parte más oculta de las cuevas, agrupados en nubes muy densas en los recodos de las rocas. Cada noche salen siguiendo un reloj interno que es «puesto a

la hora» por la luz. Forman un larga caravana por toda la cueva, con mayor densidad junto a las paredes, y luego se dispersan en el exterior, para volver rápidamente, mostrando una gran sensibilidad a la luz, antes de que amanezca (fig. 35). ¿Qué van a buscar al exterior? Pues seguramente lo que se le ha ocurrido al lector, la comida. Si se les observa bien se comprueba que salen con el tracto digestivo vacío y vuelven henchidos de fitoplancton y detritus —sus alimentos en esta cueva de las islas Medes (RIERA, ZABALA y PEÑUELAS, 1988).

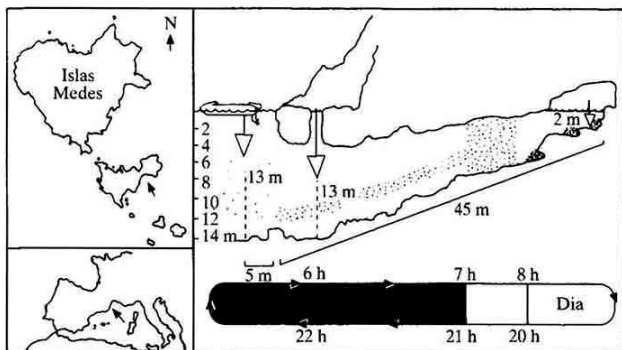


Fig. 35. Esquema de la cueva de las islas Medes. Se muestra la posición de las poblaciones de misidáceos en las distintas horas del día. Salen por la noche con el tracto digestivo vacío y lo tienen lleno cuando vuelven, de madrugada.

¿Por qué viven escondidos en la cueva, si el alimento está en el exterior? La explicación parece ser la misma que conviene a otro fenómeno muy controvertido entre los ecólogos, la migración vertical del zooplankton, que asciende a la superficie de los lagos y océanos durante la noche y desciende a determinada profundidad durante el día: para evitar la depredación. Los peces carnívoros abundan más fuera de la cueva y están más activos y ven mejor durante el día. Las observaciones realizadas en estas cuevas permiten generalizar esta explicación y rechazar otras, como por ejemplo, la ventaja metabólica de permanecer en aguas más frías cuando no se está comiendo activamente, porque en estas cuevas la temperatura interior y la exterior, y la diurna y la nocturna, son prácticamente

idénticas. La explicación basada en un mayor valor nutritivo de las algas en el período de oscuridad por ser entonces cuando sintetizan proteínas también es rechazable aquí, por cuanto estos crustáceos disponen de tiempo y alimento en cantidad más que suficiente.

4.3. COEVOLUCION. LA CONSTRUCCION DE LA COMUNIDAD EN EL TIEMPO

Los individuos que interaccionan en una comunidad coevolucionan. Cuando llega uno nuevo debe compartir los recursos, lo que ocurre tanto si es competidor, como si es amigo o depredador. Sólo cuando una comunidad constituye una asociación poco rígida de individuos no interactivos cuyos números son mantenidos bajos por constricciones no dependientes de la densidad, puede ser evitada la relocalización de los recursos. En todos los demás casos, una nueva llegada inicia un proceso de coevolución, los registros del cual se aprecian en las coadaptaciones y los mutualismos. Las coadaptaciones son ubicuas por ejemplo entre las plantas y sus herbívoros, algunas de cuyas consecuencias pueden predecirse por la optimización de la defensa. Así, organismos de grupos diversos han evolucionado juntos—coevolucionado—de manera que cada uno de ellos ha constituido un factor que ha influido en los procesos de selección a que ha estado sometido el otro. El resultado de la coevolución es la adaptación manifiesta de los unos a los otros: la trompa del insecto a la forma de la flor, el crecimiento del alga en el interior del coral...

En cada interacción entre los organismos existe una heterogeneidad en la posibilidad de acumular información. Pongamos por ejemplo la interacción insecto-pájaro y veamos las posibilidades de selección en este sistema: el pájaro come muchos insectos a lo largo de su vida; para el insecto, es muy probable que ya el primer contacto con el pájaro sea el último: el pájaro, pues, dispondrá de la posibilidad de aprender.

Como dice Margalef, así como la energía se recibe en un extremo del ecosistema —las plantas— y se va degradando, el aumento de información y los avances evolutivos tienen lugar

en mayor medida en el otro extremo, empezando por los grandes carnívoros, que enriquecen su experiencia y diversifican las condiciones de selección. Las sencillas consideraciones energéticas de los capítulos anteriores llevan a esperar que el número de animales grandes sea relativamente muy pequeño, aunque éstos tengan un peso considerable en la organización de los respectivos ecosistemas.

4.3.1. Depredación. El juego del mimetismo

La depredación, ya estudiada, ofrece interesantes ejemplos de esta evolución conjunta de dos especies. Existen muchos organismos que producen o acumulan sustancias tóxicas o desagradables. La adquisición de una coloración advertidora representa un beneficio para tales organismos, porque favorece el aprendizaje de su depredador y así evita ensayos funestos para ambos. Las coloraciones suelen ser combinaciones de colores con mucho contraste: negro, amarillo, rojo... No es de extrañar que también sean éstas las que utiliza el hombre cuando quiere llamar la atención. Entre los estudiantes de biología de Barcelona es famosa la pregunta de examen de ecología de por qué son amarillos y negros los taxis de la ciudad. Muy a menudo, muchas especies adoptan un uniforme de advertencia común (mimetismo mulleriano), con lo que el coste del aprendizaje del depredador se reparte entre todas ellas. Como toda innovación tiene imitadores, otras especies no tóxicas adoptan coloraciones similares (mimetismo batesiano). Es éste un sistema de magnificar el efecto a través del mimetismo, modelo de cómo la selección natural produce falsificaciones. Los organismos inofensivos, ante la presión selectiva, además de la opción de camuflarse adoptando formas y colores de ocultación (cripsis), disponen de la posibilidad de adoptar estos colores advertidores de peligro para no ser depredados. ¿Cuántos puede haber? Es un problema semejante al del número de piezas defectuosas que puede poner en el mercado un fabricante sin ir a la bancarrota.

4.3.2. Las defensas químicas. El juego del gato y el ratón

Los alcaloides y muchos otros compuestos tóxicos están amplia y dispersamente presentes en las plantas. Parece que se trata de adaptaciones para envenenar a todos los herbívoros excepto a aquellos pocos que poseen sistemas especializados de destoxicación. Las defensas químicas desnaturalizadoras de las proteínas, como por ejemplo los taninos, resultan costosas, pero no pueden ser destoxificadas y por lo tanto son venenos generales que causan algún tipo de efecto sobre todos los herbívoros. En consecuencia, están presentes en plantas que no se pueden defender dispersándose con facilidad, como los árboles de la comunidad clímax.

Un resultado general del uso de las diferentes defensas químicas es el incremento de la diversidad en ambos tipos de organismos, plantas y herbívoros, pues las defensas especializadas producen ataques especializados. Las flores de la pasión y sus mariposas herbívoras son ejemplos bien conocidos. Una primera defensa la constituyen las toxinas alcaloídicas, pero hay mariposas que las pueden destoxificar —pueden especializarse en una o unas pocas especies—. Algunas especies vegetales han respondido con tricomas en forma de gancho que agujerean y desgarran el cuerpo de las orugas, a lo que responden algunas mariposas con la formación de cojines de seda que les permiten moverse sin ser desgarradas, y así sucesivamente, como el juego del gato y el ratón.

4.3.3. Simbiosis y mutualismo. El beneficio mutuo

A menudo la adaptación se presenta en forma de estrecha colaboración entre diversos organismos, que adquieren así casi las características de uno nuevo. Se trata de la denominada simbiosis, de la cual todos conocemos numerosos ejemplos, entre los cuales quizá el más paradigmático sea el liquen, simbiosis de algas y hongos que le han hecho tan resistente que es el único vegetal macroscópico capaz de sobrevivir en las zonas árticas, en las cumbres de las montañas o sobre las rocas peladas, donde a menudo inicia la sucesión. Hay, sin embargo, quien opina que no estamos ante un caso de simbiosis, sino ante

un caso de parasitismo por parte del hongo sobre el alga (ALEXOPOULOS y MIMS, 1985).

Muchos mutualismos —estrecha colaboración entre organismos claramente distintos y separados— compensan el coste de una nueva especie, aliviando a la población de base de una función para la cual originalmente tendrían que ser repartidos los recursos. Así ocurre cuando las plantas hacen uso de las abejas para la polinización o de las hormigas para la defensa.

En la polinización por los insectos, la selección favorecerá aquellas características de las plantas que maximicen las visitas de los insectos a la planta huésped y minimicen los costes de las recompensas ofrecidas (néctar, señales...). Los insectos serán seleccionados por las características que maximicen la obtención de néctar con el mínimo esfuerzo de búsqueda y el mínimo tiempo de transporte. Algunas plantas han desarrollado sistemas alternativos de respiración, como la vía sensible al SHAM e insensible al cianuro, en la que no hay formación de ATP, a la que se ha atribuido la posible función de producir calor para destilar los productos secundarios que atraen a los insectos polinizadores. Sin embargo, en nuestro laboratorio hemos comprobado que dicha vía se encuentra claramente presente en todos los grupos de plantas acuáticas, las cuales tienen la temperatura del medio líquido que las mece y no se pueden calentar para destilar productos secundarios (PEÑUELAS, MURILLO y AZCÓN-BIETO, 1988), por lo que no parece que sea ésta la función de las vías alternativas de respiración en todos los casos. Quizá lo sea en las plantas aráceas, pero no en las acuáticas.

En lo que hace al caso de la protección por hormigas, las plantas que las utilizan como defensa contra los herbívoros han de ser seleccionadas para suministrar las mínimas recompensas en comida y nidos para las hormigas, mientras que las hormigas son seleccionadas por su habilidad en extraer la mayor parte de los recursos de la planta.

En ambos ejemplos, las especies ajenas a la comunidad proveen a las plantas de servicios (polinización o defensa) a cambio de recursos que la planta tendría que tener asignados a esas

funciones de todos modos. La reasignación de recursos resultante del mutualismo puede ser entendida en parte por la teoría de la optimización, pero no totalmente, porque las soluciones verdaderamente óptimas no pueden ser predichas en la evolución. Cada adaptación es una función de la historia de la especie más que un diseño óptimo, pues la selección natural opera como un proceso de lo posible para modificar lo que ya está presente.

Como ya se ha señalado, recientemente se ha mostrado que las funciones comunales pueden ser preservadas por una forma estrechamente constreñida de selección de grupo en sistemas de poblaciones panmícticas, en las que el cruzamiento es general y aleatorio y que se estructuran en subpoblaciones aisladas. Si pequeños grupos viven juntos sólo por un corto período de tiempo antes de dispersarse, pueden preservar selectivamente los genes que codifican las funciones de soporte de la comunidad. Pero la selección individual puede explicar fácilmente las propiedades más evidentes de las comunidades, como las coadaptaciones y los mutualismos.

4.3.4. Competencia, depredación y mutualismo en la estructuración de la comunidad

La estructura de la comunidad puede ser consecuencia compuesta de la competencia, la depredación y el mutualismo, cuya respectiva importancia relativa depende del ecosistema. La depredación parece particularmente importante en los sistemas acuáticos, donde los depredadores de agua abierta pueden reducir muchísimo las poblaciones de herbívoros. En los terrestres, la competencia puede ser relativamente más importante, aunque la depredación puede causar también un efecto considerable sobre la estructura de la comunidad. En sistemas complejos, como los bosques tropicales, el mutualismo puede ser el origen más común de las asociaciones estructurales.

Los ejemplos más impresionantes de coevolución, camuflaje y mimetismo se dan en los ecosistemas más maduros y estables, como los bosques tropicales y los arrecifes de coral.

4.4. LA PALEOECOLOGÍA: EL REGISTRO FÓSIL. HOMENAJE A COLINVAUX

A modo de homenaje a Colinvaux, en cuyos libros me he inspirado para desarrollar algunos de los temas tratados en esta primera parte, he aquí un resumen de su concepto de la paleoecología, una de las ramas de la ecología en que más ha destacado.

La paleoecología, en su sentido biológico más amplio, es la reconstrucción de las historias, estrategias y nichos de las especies extintas, mediante la combinación de la evidencia física y química de los ambientes pretéritos con los datos de formas de vida proporcionados por los fósiles; desde el punto de vista más estrictamente ecológico, es el uso del registro fósil para reconstruir las historias de las poblaciones o comunidades con el fin de probar las hipótesis ecológicas contemporáneas.

La distribución de la vida sobre la Tierra y su abundancia se han desarrollado gradualmente mediante migraciones y competencias a lo largo de miles de generaciones. Hemos formulado ciertas hipótesis acerca de los sucesos pasados para explicar las características de la vida moderna: ahora debemos ir al registro fósil para probarlas.

Los registros cuantitativos de microfósiles preservados en los sedimentos de los lagos, cenagales u océanos son muy útiles porque permiten seguir la evolución de los ecosistemas, con los cambios de poblaciones, de especies y de ambientes. Así se ha podido comprobar, por los fragmentos de carábidos (escarabajos) encontrados en los sedimentos de lodazales, que estos animales no han sufrido apenas evolución morfológica o fisiológica durante varios cientos de miles de años. El registro de diatomeas en los lagos puede ser utilizado como medida directa de la composición cambiante del fitoplancton, posibilitándose con ello el estudio de las teorías de construcción de las comunidades. Los fósiles del zooplancton en los lagos, acompañados de las pruebas aportadas por la química del sedimento, han permitido contradecir la hipótesis de que los ecosistemas lacustres son autorregulados y controlados por la biota, mostrando

que en realidad la parte biológica del eco-sistema es determinada casi totalmente por las entradas físicas procedentes del exterior del lago.

También los granos de polen preservados en lagos y lodazales explican la historia de las comunidades de plantas, y permiten medir las proporciones de las diferentes especies y obtener estimaciones del cambiante tamaño de la población vegetal. Así se ha comprobado de qué modo han cambiado las asociaciones de plantas desde la última era glacial. Una tradición aparecida ya tempranamente en el estudio del polen es la reconstrucción de los climas pasados usando las asociaciones de especies como indicadores groseros. Esta aproximación ha sido recientemente refinada con la aplicación del análisis estadístico multivariante, que los relacionaron la temperatura y la precipitación. El estudio del polen también tiene interés en arqueología, para demostrar la expansión de la agricultura en la edad de piedra, o las condiciones de vida de los aborígenes americanos, etc.

Los mejores mapas del clima de la era glacial han sido confeccionados utilizando técnicas estadísticas en relación con las asociaciones de foraminíferos planctónicos preservados en el fondo del mar. Estos fósiles hacen posible establecer también una cronología del pleistoceno, porque las concentraciones del isótopo ^{18}O en su esqueleto registran los cambios en la química del océano consecuentes al aprisionamiento de agua en capas de hielo.

Un método más general de datación es la medida de desaparición de ^{14}C en la materia orgánica muerta, método que usualmente permite establecer edades hasta un límite de 35.000 años. Para datar el pasado pueden también utilizarse otros isótopos, incluidos los del uranio y los del cesio.

Los calendarios más completos de los últimos 7.000 años se han conseguido mediante el estudio de los anillos de los árboles, tanto observando la anchura de los anillos como analizando el contenido de ^{18}O , usado como termómetro. Otro termómetro potencial del pasado es la proporción entre plantas C_4 y C_3 , deducida a partir de los fragmentos carbonizados de hojas presentes en los sedimentos de los lagos.

Con todas estas técnicas se puede reconstruir la historia de la vida sobre el planeta. En la figura 36 se detallan los principales hitos.

4.5. LAS EXTINCIONES EN MASA DE ESPECIES

Una cuestión que todo observador de la vida se plantea es el motivo de que se haya extinguido el 99,9% de las especies. En efecto, de los cuatro mil millones de especies que pueden haber aparecido a lo largo de la historia de nuestro planeta, sólo persistieron unos pocos millones: la extinción es casi tan común como la aparición.

La probabilidad de extinción aumenta con la disminución del tamaño de la población. Las extinciones recientes de aves y mamíferos demuestran la susceptibilidad de las poblaciones insulares. Estas extinciones no son aleatorias, sino que son causadas por la incapacidad de evolucionar en respuesta a unas condiciones cambiantes. Sin embargo, la suposición clásica de que la extinción se deba a una inferioridad competitiva no puede ser siempre mantenida. Un ejemplo claro lo tenemos en el clásico error de comparación entre las faunas de Norteamérica y Sudamérica.

De todos es conocido que en época reciente el hombre, con su acción, ya sea directa —caza—, ya indirecta —destrucción del ecosistema ante su avance inexorable—, es el causante de la extinción de un gran número de especies. Las listas publicadas en las revistas de conservación de la naturaleza son impresionantes, y más si se subraya que no suelen incluir ni invertebrados ni plantas, pero aun así, a lo largo de la historia de la tierra esta acción no deja de ser insignificante, por lo menos hasta ahora y mientras no se prodiguen accidentes como el de Harrisburg o el de Chernobyl o prosiga la tala de los bosques amazónicos. Son mucho más espectaculares las extinciones en masa, como la ocurrida en el cretácico, que por su intensidad han sido utilizadas para definir los distintos períodos de la historia de la Tierra.

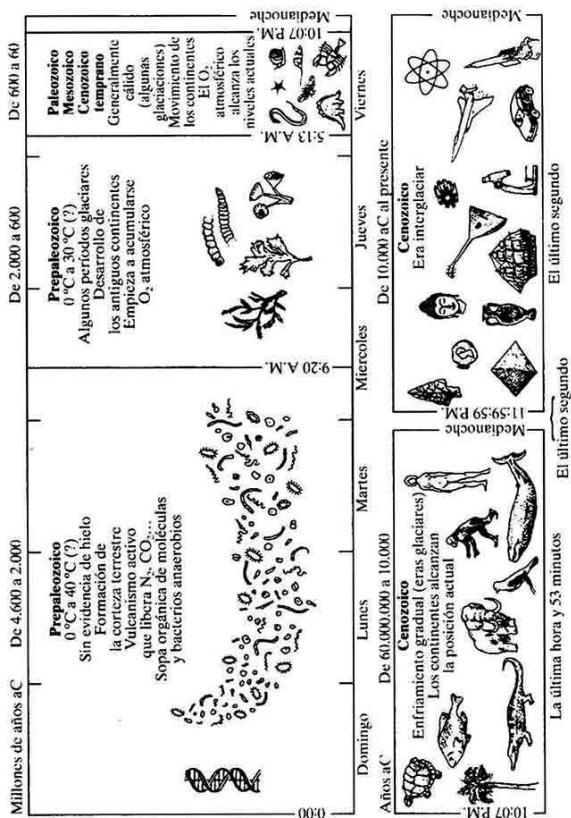


Fig. 36. Los grandes hitos de la historia de la vida sobre el planeta, representados como si de seis días se tratase. (Adaptado de SCHNEIDER Y LONDER 1984).

Las extinciones en masa no se hallan distribuidas uniformemente a lo largo del tiempo, sino que están concentradas de forma especialmente activa en unos pocos períodos de tiempo. Dos episodios señalan períodos bien conocidos: la gran extinción del pérmico, que pudo haber eliminado más del 90% de las especies marinas de aguas someras hace unos doscientos veinticinco millones de años, y la debacle del cretácico, que

eliminó a los dinosaurios y a diversas criaturas marinas hace unos sesenta y cinco millones de años. Hay otras tres menos impresionantes: dos antes del pérmico (ordovícico y devónico) y una entre el pérmico y el cretácico (triásico).

La cuestión de las extinciones en masa ha cobrado renovado interés tras la polémica provocada por la hipótesis del grupo de ALVAREZ (1980), que establece que la gran extinción de especies acontecida a finales del cretácico, especialmente popular por la desaparición de los dinosaurios, la subsiguiente irradiación de los mamíferos y en última instancia la evolución humana, fue provocada por el impacto de un meteorito gigante, un planetoide. Otros grupos, como los reptiles acuáticos y los anfibios, apenas fueron afectados por esta extinción, mientras que las plantas sufrían una extinción moderada. Una selectividad semejante ha caracterizado a todas las grandes extinciones.

4.5.1. Selectividad y evolución

Desde que se reconoció que han existido períodos de extinción en masa seguidos de otros con tasas de extinción menores, se asumió que la única diferencia entre ellos era cuantitativa. Sin embargo, según un reciente trabajo de JABLONSKI (1986), de la Universidad de Chicago, se dan también diferencias cualitativas. Se establecen, pues, dos tipos de extinción, que actúan a niveles diferentes: la normal sobre las especies, y las grandes extinciones en masa sobre estirpes de especies. Las características que permiten a las especies prosperar durante los períodos normales son un alto tamaño de la población, una amplia distribución geográfica y una elevada capacidad de dispersión; en el caso de las estirpes, las favorecidas son las que presentan una elevada riqueza específica.

En cambio, durante las grandes extinciones estas ventajas dejan de serlo y las estirpes favorecidas son las de amplia distribución geográfica, independientemente del número de especies. Por tanto, las adaptaciones específicas pueden ser eliminadas durante las grandes extinciones por razones no relacionadas con su utilidad. Así, el éxito de los mamíferos placent-

rios con respecto a los marsupiales podría haber sido simplemente el resultado de la distribución geográfica, no de la calidad de la adaptación. De hecho, a finales del cretácico los marsupiales estaban distribuidos en las áreas circunecuatoriales, mientras que los placentarios lo estaban mucho más ampliamente.

La evolución, considerada en el sentido darwinista clásico, favorece las adaptaciones ventajosas por medio de la selección natural siempre que sean heredables genéticamente. Durante los períodos normales, el proceso es éste; pero, puesto que las extinciones en masa actúan a un nivel superior al específico y ciegamente a las adaptaciones individuales, la cuestión a plantearse ahora es si las stirpes de amplia distribución geográfica generan otras también cosmopolitas. Aunque en algunos casos ocurre así, la norma es distinta en la mayoría de los casos estudiados. Como la vida media de las especies —a escala geológica— es muy corta (generalmente menos de diez millones de años), la extinción tiene un importante papel en la evolución. De manera convencional se le ha venido asignando un papel constructivo: la eliminación de las especies peor adaptadas. Pero, a la luz de lo aquí explicado, puede que sea selectiva, no constructiva. Los organismos se enfrentan a condiciones tan diferentes de las habituales que la extinción en masa se convierte en una cuestión aleatoria. Algo de esto debió de ocurrir en la de finales del cretácico, pues dinosaurios y mamíferos habían coexistido durante más de cien millones de años.

Puede que los dinosaurios no hubieran hecho nada incorrecto en el sentido darwiniano, puede que no fueran tan «tontos» o tan «ineptos» como a menudo nos han sido pintados. En realidad, las reconstrucciones anatómicas modernas indican fuerza y agilidad, y muchos paleontólogos creen ahora que los dinosaurios eran endotermos. Y en todo caso, lo sobresaliente en los dinosaurios no es que se extinguieran sino que dominaran la Tierra durante tanto tiempo, durante unos cien millones de años. Para llamar a la humildad al hombre cabe recordar que desde el *Australopithecus* han pasado menos de cinco millones de años, y sólo cincuenta mil años desde el surgimiento de

nuestra propia especie, el *Homo sapiens*. Existen otras explicaciones en lo que hace a la selectividad de la extinción en masa. El tamaño grande constituiría una desventaja, por lo menos para los animales terrestres. Los organismos tropicales y los grupos que ya presentan altas tasas de especiación y extinción en condiciones normales serían también los más expuestos. En general, sin embargo, no se conoce bien el fenómeno de la selectividad biológica, con lo que se carece de una pista importante para desentrañar las causas de las extinciones.

4.5.2. Causas y periodicidad

Las causas más citadas de las extinciones en masa son los cambios en el nivel del mar y en el clima. La hipótesis de los meteoritos no gozó de mucho predicamento hasta la notable prueba presentada por el grupo de ÁLVAREZ (1980), al descubrir enriquecimiento de iridio y otros materiales propios de los meteoritos en los sedimentos de finales del cretácico. Pero a pesar de la consistencia de esta prueba, sigue habiendo detractores del posible impacto. Las extinciones de gran magnitud, como la del cretácico, son relativamente raras (quizá unas cinco en los últimos seiscientos millones de años). De forma parecida son raras las colisiones con objetos de gran tamaño (quizá diez en el mismo período). Parece poco probable, pues, que coincidan, y de ahí las conclusiones conflictivas. Es necesario estudiar la cronología geofísica y geoquímica de los impactos y la biológica para poderlas comparar.) Puede que se demuestre que los impactos fueron los causantes, pero muchos autores creen que lo fueron cuando los organismos ya estaban en condiciones ambientales difíciles, como las producidas por cambios de clima o del nivel del mar. Los geólogos, como todos los grupos, tienen sus propios prejuicios. Prefieren las causas emanadas de su propio dominio, la Tierra. Sin embargo, tras el trabajo del grupo de Alvarez, y por primera vez, podemos esperar que existan evidencias de causas extraterrestres de las extinciones en masa en el registro geológico. Así, las afirmaciones de que esas teorías debían ser desechadas porque no

teníamos posibilidad de contradecirlas con evidencias, han desaparecido.

Tras los últimos estudios parece que las extinciones en masa se distribuyen regularmente a lo largo de la historia terrestre, cada 26-32 millones de años. Se han propuesto varias explicaciones astrofísicas, como la de aumentos periódicos en la probabilidad de impactos de asteroides, lo que ligaría bien con la teoría del grupo de Álvarez.

Algunos trabajos recientes han mostrado una periodicidad de los cráteres producidos por meteoritos, compatible con la de las extinciones. Sin embargo, aunque posiblemente vayan ligadas, periodicidad y extinción pueden tener lugar sin necesidad una de la otra.

El aún menguado nivel de conocimiento hace necesarias extensas e intensas investigaciones para confirmar las hipótesis formuladas. Y ello tiene interés: la humana, surgida tan sólo un minuto antes de la medianoche en el reloj geológico (fig. 36), no es sino una más entre los millones de especies que tienen por destino la extinción. Esperemos que el día que amanece sea largo.

4.6. EL TIEMPO EVOLUTIVO. BREVES CONSIDERACIONES SOBRE SELECCIÓN Y EVOLUCIÓN

Uno de los aspectos más fascinantes de la ecología es el estudio del escenario del cambio y de la evolución sujeta a las presiones de selección a lo largo de miles de millones de años.

Las especies deben adaptarse al medio físico-químico que las rodea: a la interacción con las otras especies, depredadores, presas o parásitos, y a la interacción entre los individuos de la misma especie, a través del sexo, la familia o la sociedad. En este sentido, son clásicos los estudios que demuestran la acción de la selección natural sobre el melanismo industrial de las mariposas británicas como respuesta a la industrialización. Ante el oscurecimiento de los sustratos sobre los que se posaban, como consecuencia de la aparición de la polución industrial, se seleccionaron las mariposas oscuras, melánicas (KETTLEWELL

1958). La selección es también bien conocida por el hombre, que la aplica a las plantas cultivadas y a los animales domésticos.

La evolución ha actuado operando todos aquellos cambios que podían tender a maximizar la tasa reproductiva de los individuos y que eran posibles porque se ejercían sobre lo disponible, no sobre la creación de organismos absoluta y radicalmente nuevos. Se ha movido, pues, más por el camino de las reformas que por el de las revoluciones.

Aun así, si no se invoca el cambio discontinuo producido por pequeñas alteraciones en las tasas de desarrollo, no se ve cómo pudo tener lugar la mayoría de las grandes transiciones evolutivas.

4.6.1. Entre lo posible y lo disponible. Consideraciones sobre la evolución de los macrófitos

¿Cómo es que, a lo largo de la evolución, no se han desarrollado mecanismos para solucionar los problemas que hacen inviables a las fanerógamas acuáticas en las aguas continentales por debajo de los ocho o diez metros? (véase 3.1.3.4). Para evitar el problema de la toxicidad de las presiones parciales elevadas de oxígeno generadas en profundidad (fig. 26), podían haber sido eliminados los espacios aéreos aumentando la superficie de contacto con el exterior mediante formas sinuosas, o haber desarrollado mecanismos desactivadores de la toxicidad del oxígeno, como carotenos protectores a altas tensiones de este gas o sistemas enzimáticos más potentes, etc. En este caso, como en tantos otros del mundo, vivo, las cosas se fijaron al comienzo y la evolución parece haber tenido «pereza» de cambiarlas, de manera que ha limitado la profundidad a que crecen las plantas superiores y ha dejado que fuesen las inferiores, algas y briófitos, los productores primarios colonizadores del bentos a profundidades superiores a los diez metros. La evolución trabaja sobre lo ya existente y por lo tanto está condicionada por el pasado; no inventa diseños ideales absolutamente nuevos sino que tiende más bien a realizar chapuzas con

aquello de que dispone. Lo que no es óbice para que, de vez en cuando, nos sorprenda con creaciones extraordinarias.

4.6.2. Estrategias de las especies y evolución cultural

Las especies siguen diferentes formas de adaptarse a las exigencias del entorno. Las estrategias de la *r* (gramíneas o pequeños crustáceos del plancton), con elevada tasa de mortalidad pero que se multiplican rápidamente, representan canales abiertos al flujo de energía; la rápida renovación de la población les permite seguir fácilmente las fluctuaciones del ambiente externo. Los estrategias de la *k* gozan de una vida relativamente más larga, tienen pocos hijos pero los protegen, y renuevan sus poblaciones mucho más lentamente. Así que estas especies se aprovechan más de la capacidad de acumular información, incluso de tipo cultural, no transmisible genéticamente a los descendientes (véase la introducción a la segunda parte). En este sentido, es obvio que no se puede restringir el uso del nombre cultura a la información adquirida por el hombre por vía no genética. Los pájaros también tienen su cultura y sus dialectos locales, y un árbol es una entidad cultural como lo es la red viaria de una ciudad o un país.

4.6.3. La evolución en el ecosistema. Los canales genético, ecológico y cultural

Margalef (1980) ve en el ecosistema un canal de información subdividido en tres niveles diferentes. Un canal genético de estructuras individuales replicables; otro, ecológico, basado en la interacción entre diferentes especies coexistentes y expresado por la constancia o por los cambios de sus respectivos números de individuos, y un tercero, cultural, que transmite lo que se ha aprendido mediante la actividad individual a las generaciones futuras, de manera externa al canal genético. Este último canal tuvo una importancia ínfima al principio de la historia de la vida, pero ahora está aumentando emisivamente. En él se pueden incluir la formación de pistas y galerías, la memo-

ria del comportamiento colectivo imitativo y finalmente el legado de los utensilios y todas las manifestaciones culturales del hombre.

La memoria ecológica parece que siempre ha representado el papel de auxiliar, con una capacidad bastante limitada y constante. En cambio, la información genética ha preservado cantidades crecientes de estructura capaces de influir en el futuro; el canal genético se ha ensanchado, pues, sin duda mucho más rápidamente que el ecológico. Y aún lo ha hecho más el canal cultural, que se ha ampliado extraordinariamente con el desarrollo de los vertebrados y de forma exponencial con el hombre.

SEGUNDA PARTE

LA ANTROPOSFERA

LA ANTROPOSFERA, ¿CAPA CANCEROSA DE LA BIOSFERA?

La naturaleza, «nuestro silencioso magno creador», ha pasado a ser objeto de escrutinio por parte de una de sus especies, capaz de pensar y analizar, y capaz de modificar el medio: nosotros, los seres humanos. Constituimos una más de los millones de especies del árbol de la vida, pero nuestra gran invención evolutiva, la conciencia, junto a un cuerpo sin ningún mérito especial, ha transformado la faz del planeta. La arrogancia antropocéntrica ya viene de antiguo, pues ya Protágoras afirmaba que el hombre es la medida de todas las cosas, y así hasta nuestros días, en los que esa arrogancia ha aumentado sus fundamentos. Y si no, miremos desde la ventanilla de un avión y veremos nuestras huellas por todas partes. Vivimos en continua tensión entre nuestra unión con la naturaleza y nuestra particularidad.

El hombre forma parte de la biosfera, coexiste con los otros seres vivos y es regido por las mismas leyes, pero sus características actuales le confieren una trascendental capacidad de impacto sobre la misma biosfera y el planeta entero, de modo que la capa constituida por el *Homo sapiens sapiens* y sus realizaciones se muestra como un creciente forúnculo, un creciente «cáncer», que se extiende más y más, pudiendo llegar a cubrir la capa biosférica, lo que hace que se la haya podido considerar como una capa sobrepuesta, merecedora de un nombre propio, el de antroposfera.

Es ésta una visión distinta de la de Teilhard de Chardin, que describía su noosfera como la capa humana psíquicamente reflexiva que forma una realidad física, una capa fina y frágil, extendida por toda la Tierra, la más profundamente individualizada y la más específicamente distinta. El la veía como algo predeterminado desde el inicio. «Ahora el espíritu empieza a dominar sobre la materia.» Su visión era teológica, dirigida hacia Dios-Omega, lo que no deja de ser un dogma de fe y como tal indemostrable. Por lo tanto, se aleja de las pretensiones de

este libro. El hombre ha surgido del tiempo de la evolución sin que sea la obvia realización de un fin propuesto ni la culminación de una esforzada carrera hacia lo óptimo.

Tampoco la utilizo en el sentido restringido empleado por HALL (1977) al definir su industriósfera como el conjunto de manchas de actividad industrial movidas por combustibles fósiles.

EVOLUCIÓN DEL *HOMO SAPIENS SAPIENS*. LAMARCK VENCE A DARWIN EN EL CANAL CULTURAL

Mientras leemos estas páginas, nuestro cerebro se llena de actividad eléctrica, millones de neuronas pasan mensajes, guían nuestros ojos a lo largo de estas líneas, captan la forma de las letras y después de buscar referencias en la memoria, nos permiten reconocer las palabras y el mensaje. Y lo más asombroso es que somos capaces de darnos cuenta de que estamos leyendo: el cerebro se contempla a sí mismo en la actividad más tentadora, inteligente y versátil de las conocidas en la naturaleza. Linneo, cuando clasificaba y caracterizaba las especies, al llegar al *Homo sapiens*, escribió simplemente, siguiendo la tradición socrática: «se conoce a sí mismo».

Parece establecido aún en el seno de la enorme controversia que despiertan los estudios que tienen por objeto al ser humano, que el orden de los primates, al que pertenece nuestra especie, procede de animales insectívoros que se adaptaron a la vida arborícola, y adquirieron la visión estereoscópica y la mano prensil. Muy probablemente la forma bípeda, aún con un cerebro pequeño, apareció en el continente africano hace entre cinco y seis millones de años, como consecuencia de un cambio climático que redujo las selvas y amplió las sabanas. A partir de aproximadamente hace dos millones de años, quizá también como consecuencia de un nuevo cambio climático, se inició el crecimiento del cerebro. La mano, liberada de funciones locomotoras, el lenguaje —con la abstracción que implica— y el auge de la caza parecen estar en la base de este crecimiento cerebral. El incremento de volumen cerebral tuvo

lugar dentro de un sistema de retroalimentación con la innovación de la cultura, la invención de habilidades técnicas, y el desarrollo de la comunicación verbal y la organización social.

El análisis lingüístico moderno ha revelado que todas las lenguas humanas comparten unas pautas fundamentales comunes de relaciones (CHOMSKY 1971, TUSÓN 1984). Incluso los dialectos más «primitivos» de las tribus africanas o de los aborígenes australianos tienen en común con el ruso, el español, el catalán, el chino o el inglés una estructura formal básica, lo que parece indicar una organización común del cerebro humano.

Esta fase de la evolución humana parece que duró bastante más de un millón de años y que ocurrió en las sabanas del norte de África; en ella el *Homo erectus* devino *Homo sapiens*, ser erguido, con cerebro bien desarrollado, hábiles manos y buena vista. Fue ésta la época de la caza y la recolección, que aún practican ciertos pueblos primitivos —cada vez menos— de América del Sur, África o Australia. Estamos ya ante un hombre que acepta el entorno como algo que se le da, lleno de oportunidades que aprovechar y de peligros que deben ser evitados.

La siguiente fase empieza con las primeras manipulaciones de la naturaleza, con el inicio de la agricultura y la ganadería, que implican el paso del nomadismo al sedentarismo y la generación de las primeras desigualdades importantes entre los hombres. La evolución cultural, entendida como la que tiene lugar en el material y la organización que se transmiten no genéticamente de generación en generación, empieza a primar hasta convertirse en la más importante, con un creciente peso del orden social. La evolución cultural, con distinto mecanismo, se superpone a la biológica, y aunque no la suprime, su mayor rapidez oscurece los efectos» de la más antigua.

Tanto el lamarckismo como el darwinismo son teorías enraizadas en el concepto de adaptación. Los organismos responden a los cambios de ambiente desarrollando formas, funciones y comportamientos más adecuados a las nuevas condiciones. Según ambas, debe haber transferencia de información del ambiente al organismo. En el lamarckismo, la transferencia es directa y el organismo responde y pasa su información a la des-

cendencia. En cambio, el darwinismo requiere dos pasos: la variación genética presente en los seres vivos —no orientada en dirección adaptativa— y la selección que actúa sobre ella y modifica una población confiriendo mayor éxito reproductivo a las variantes ventajosas.

El lamarckismo, por lo que conocemos hasta ahora, es falso como teoría de la herencia genética. Sin embargo, es una modalidad de «herencia» adecuada para otra clase muy diferente de evolución, la cultural. En el *Homo sapiens*, que para muchos autores surgió hace unos cincuenta mil años, parece que no ha habido ningún progreso genético evidente desde entonces. Como afirma GOULD (1980), seguramente que el hombre de Cromagnon medio, entrenado adecuadamente, podría manejar los ordenadores tan bien como el más hábil de los hombres tecnológicos actuales (incluso parece que su cerebro era mayor que el nuestro). Todo lo que hemos conseguido, para bien o para mal, es resultado de la evolución cultural, y esto sólo en un milisegundo del día geológico en el que hemos transformado la superficie de nuestro planeta gracias a la aparición de la reflexión. Hemos pasado de unos cuantos miles de personas con hachas a más de cinco mil millones con bombas y televisores, ¡y todo ello apenas sin cambio genético significativo!

Durante esta fase, la mayor parte de los logros en el control de la evolución de las demás especies fueron conseguidos por azar; en L la era biotecnológica que ahora se inicia, el hombre va a ser capaz de efectuar sus propias mutaciones y con el tiempo puede que incluso planifique los organismos vivos: será el dueño de la evolución de las demás especies y de sí mismo, lo que no deja de causar cierta ansiedad. Además de transmitir la herencia cultural se podrá decidir la herencia biológica. Incluso puede que en los próximos siglos se resuelva, dada la celeridad de los avances en los últimos cien años y especialmente en los últimos treinta, cómo se determinan las estructuras de los organismos y posteriormente, ¿por qué no?, cómo se determinan las bases del comportamiento.

Así pues, desde la revolución industrial, y especialmente desde la tecnológica iniciada en estas últimas décadas, la evo-

lución darwiniana ha ido perdiendo importancia en nuestra especie. La que rige ahora nuestra evolución es la cultural, que en contraste con la biológica, es lamarckiana; lo que aprendemos lo transmitimos directamente, enseñando y escribiendo, en la tecnología y en la cultura. La evolución lamarckiana es rápida y acumulativa. La aceleración que genera nos ha colocado en la «cresta de la ola». Puede que siga creciendo, se estabilice o se precipite al abismo: depende de nosotros.

V. LA ANTROPOSFERA EXPLOTA LA BIOSFERA

La especie humana es tan numerosa y ejerce tal control, que sin ella no se entiende el funcionamiento presente de la mayor parte de los ecosistemas (fig. 37). Su actividad afecta a toda la biosfera a pesar de que su biomasa es del orden del 10^{-5} veces el total. El hombre explota y determina su regresión, favorece las especies oportunistas y aumenta la razón entre la producción y la biomasa.

Las características del desarrollo en los sistemas naturales hacen que éste tienda al incremento —estrategia de máxima protección—, lo que contrasta con el propósito humano de máxima producción —es decir, de obtención del máximo rendimiento posible— (fig. 38). Éste es el primer principio que se debe reconocer cuando se estudia el conflicto entre el hombre y la naturaleza, y es el que deben tener en cuenta los encargados de la política ambiental. La oposición íntima entre explotación y sucesión está en el centro de todos los problemas de conservación de la naturaleza. Por ejemplo, el fin de la agricultura o de la industria forestal es obtener altas tasas de producción de productos fácilmente recolectables con poco material acumulado en el ambiente, es decir, un cociente entre la producción y la biomasa elevado. Por contra, la naturaleza, como hemos visto en 4.1, tiende hacia la elevación del cociente inverso, es decir, entre la biomasa y la producción. El hombre trata de obtener su propósito manteniendo los ecosistemas explotados en sus estadios iniciales de sucesión, a menudo monocultivos; pero sin duda necesita muchas otras cosas, entre ellas una atmósfera y un clima regulados —equilibrados— por los océanos y las masas de vegetación, agua limpia —es decir, improductiva, oligotrófica— para sus usos culturales e industriales, y muchos otros recursos de los ciclos vitales, aparte de

los estéticos y recreativos, que son proporcionados por el paisaje, por una naturaleza menos productiva. En el contraste entre ambas estrategias radica la mayoría de los conflictos entre la antroposfera y la biosfera.

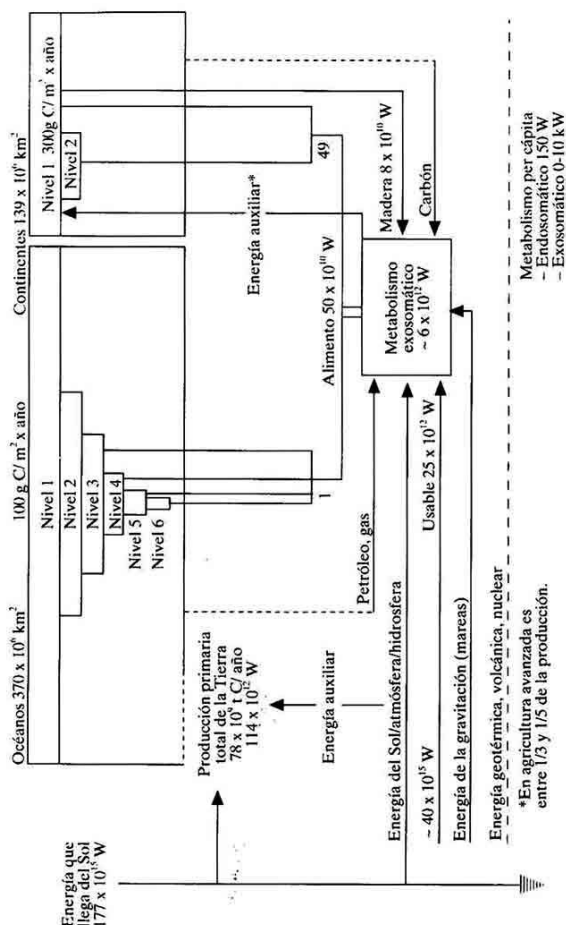


Fig. 37. Flujo de energía solar y su utilización por los grandes tipos de ecosistemas y por el hombre. (Modificado de MARGALEF, 1980.)

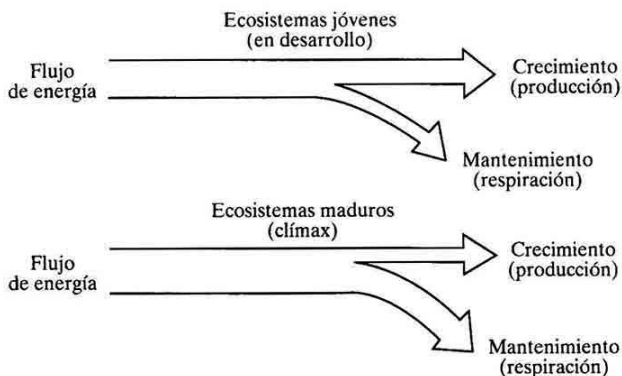


Fig. 38. Contraste en la partición de la energía entre los ecosistemas jóvenes, en los que está interesada la antroposfera, y los maduros, a los que tiende la biosfera.

5.1. UN ECOSISTEMA ANTROPOSFERICO ACUATICO: EL EMBALSE

El hombre ha construido algunas estructuras visibles desde el espacio. Los embalses, especie de lagos artificiales resultado de la construcción de barreras o presas en los cursos fluviales, son una de ellas. Los primeros se construyeron en Mesopotamia hace miles de años, y en España los hay que datan del tiempo de los romanos y que aún están en uso. Los mayores, de más de 5.000 km² de extensión, se han construido este siglo, principalmente en la extinta URSS y en África. Han proliferado tanto los embalses, que en la actualidad regulan una cuarta parte del caudal total de los ríos de la Tierra. Siguiendo una estrategia de multiuso, se utilizan para producir energía eléctrica (se consigue 1 MW por cada 3 hm³ o 4 hm³ de agua embalsada), para irrigar grandes extensiones de tierra, para controlar las crecidas de los ríos, para refrigerar plantas eléctricas, térmicas y nucleares, para pescar, para actividades recreativas y turísticas, y cada vez más para suministrar agua a industrias y ciudades. Los embalses constituyen, pues, un elemento muy importante de nuestra vida cotidiana.

5.1.1. Dinámica del agua

Al igual que en los lagos, el agua que entra circula hacia el estrato que tiene su misma densidad. La estratificación de la masa de agua depende del clima, la morfometría de la cubeta y las fluctuaciones del nivel. En nuestro país, de clima templado, lo que rige la estratificación es el ciclo térmico anual. En verano, las capas superficiales, que absorben intensamente la radiación de onda larga, se calientan, pierden densidad y no se mezclan con las más profundas. Como la difusión de calor es muy pequeña y el viento no tiene suficiente fuerza para mezclarla, la masa de agua se divide en dos capas: una superior, de temperatura elevada (epilimnion), y otra inferior, más fría y por tanto más densa (hipolimnion). Entre una y otra se crea un gradiente brusco de densidad y temperatura, denominado termoclina, que hace difícil la mezcla. En otoño, el agua superficial se va enfriando hasta que se igualan las temperaturas y las densidades. Es entonces cuando el viento produce la mezcla de toda la masa de agua hasta el verano siguiente, en que se reanuda el ciclo (fig. 24).

Estos procesos físicos provocan cambios sucesivos en las características químicas del agua y en la actividad de los organismos que en ella viven. En invierno, después de la mezcla, la composición química es homogénea y depende fundamentalmente de los aportes del río y de la redisolución de sustancias anteriormente precipitadas en el sedimento. Hasta donde llega la luz, la actividad fotosintética de los organismos transforma el anhídrido carbónico y las sales inorgánicas disueltas, los nutrientes, en materia orgánica desmenuzada y oxígeno. Por debajo, a mayor profundidad, la actividad respiratoria y descomponedora invierten este proceso cerrando el ciclo de la materia. No ocurre así en verano, cuando la termoclina impide la ascensión de los nutrientes a las capas superiores, donde rápidamente se agotan los existentes y disminuye la actividad asimiladora, a menos que el río los aporte en gran cantidad tras cruzar por zonas desforestadas o con importantes núcleos urbanos, industriales o agrarios. En ese caso, la producción de materia orgánica aumenta, existe un importante flujo de oxígeno y nitrógeno a la atmósfera y se acumulan carbono y fósforo en los

sedimentos, tras el depósito de organismos muertos. Éste es el comportamiento típico de los sistemas eutróficos, es decir, «bien alimentados», que favorecen la producción de grandes biomásas de organismos.

5.1.2. Organismos

Ligados a una espesa red de relaciones tróficas, en los embalses se desarrollan numerosos organismos parecidos en su mayor parte a los de los lagos. En suspensión en el agua se encuentran vegetales macroscópicos —de poca importancia en nuestras latitudes, pero incluso problemáticos en los países tropicales, donde suelen ser mucho más abundantes— y microscópicos. Estos últimos constituyen el fitoplancton, que junto con el zooplancton, conjunto de animales microscópicos en suspensión, proporcionan mucha información sobre las características del embalse. En el fondo moran principalmente gusanos y larvas de insectos que resisten bien las bajas concentraciones de oxígeno y el continuo depósito de materiales. En los márgenes, donde el nivel del agua no es constante y no hay acumulación sino erosión, sólo pueden desarrollarse insectos y otros animales poco exigentes en la alimentación y con gran capacidad procreadora. Finalmente, nadando en el agua, se encuentran los organismos más conspicuos, los peces, que en nuestro país son más propios de ríos que de lagos: el barbo, la boga, el bagre... Son poco abundantes y se sitúan principalmente en las confluencias de los ríos, de las aportaciones de los cuales se alimentan. En los últimos años se han introducido también especies carnívoras (el lobo de río, el «black bass», la carpa, etc.) destinadas a la pesca deportiva.

5.1.3. Incidencia

Los embalses reportan diversos beneficios, expuestos anteriormente, que han aconsejado su construcción y a los que cabría añadir otros aspectos positivos, como el papel sustitutorio de las cada vez más menguadas lagunas costeras en las rutas migratorias de las aves, o como la incorporación de muchas

sustancias al sedimento, con lo que se mejora la calidad del agua liberada por el embalse. Este último fenómeno es muy evidente en las aguas del río Ter tras la cadena de embalses de Sau, Susqueda y el Pasteral, cuya acción combinada acentúa el proceso de depuración natural (PUIG *et al*, 1987) (tabla 4).

Los embalses, sin embargo, presentan algunos problemas y efectos secundarios negativos que no se deben olvidar en el momento en que se realiza su proyecto y en su posterior gestión: se anegan valles generalmente fértiles, dedicados a la agricultura; a veces se obliga a poblaciones importantes a cambiar de asentamiento; causan muchos problemas, frecuentemente irresolubles, a los peces migratorios; las fluctuaciones del nivel del agua provocan la formación de charcas laterales en las que se pueden desarrollar mosquitos y otros tipos de plagas, especialmente en los países tropicales; la carga de agua sobre el sustrato puede provocar microsismos que ponen en peligro las presas; su vida media, como consecuencia de la sedimentación de los materiales aportados por el río y por la erosión de los márgenes, es relativamente corta, de sólo unos sesenta o setenta años en los construidos cerca de las cabeceras, y para alargarla es aconsejable no destruir la vegetación de ribera y construir pequeñas presas en la cola y en las bahías laterales; el sedimento que retienen no llega a las zonas de desembocadura, deltas y marismas, que entran así en regresión (delta del Ebro). Pero los problemas más usuales son la eutrofización y la contaminación, dos fenómenos muy ligados al manejo del agua por la antroposfera. En los embalses eutróficos, gran parte de la cuantiosa producción de materia orgánica no se aprovecha y se deposita en el sedimento, donde, como consecuencia, las aguas se convierten en anóxicas y hacen posible el crecimiento de bacterias reductores cuyo metabolismo produce sustancias que atacan las construcciones de cemento y de hierro. Además, cuando este agua anóxica del hipolimnion es liberada origina problemas secundarios río abajo. Se hace, pues, aconsejable la construcción de torres de toma de agua que proporcionen la posibilidad de escoger el nivel de extracción, en especial cuando el agua está destinada a usos domésticos o industriales.

Estaciones de muestreo			
Comunidades	Antes de los embalses		Después de los embalses
	18 y 21	22	30 y 38
Diatomeas	<i>Diatoma elongatum</i>	<i>Nitzschia palea</i>	<i>Frágilaria construens</i>
	<i>Navícula gregaria</i>	<i>N.gandersheimien</i>	<i>F. construens venter</i>
	<i>N. tripunctata</i>	<i>sis</i>	<i>F pinnata</i>
	<i>N. lanceolata</i>		<i>F. brevistriata</i>
	<i>Nitzschia frustulúm</i>		
	<i>N. romana</i>		
Macrófitos	<i>Leptodictyum riparium</i>		<i>Cinclidotus fontinaloides</i>
	<i>Rhynchostegium</i>		<i>Fontinalis antipyretica</i>
	<i>riparioides</i>		<i>F hypnoides</i>
	<i>Eurhynchium</i>		<i>Fissidens crassipes</i>
	<i>speciosum</i>		<i>Leptodictyum riparium</i>
	<i>Dialytrichia</i>		<i>Rhynchostegium</i>
	<i>mucronatas</i>		<i>riparioides</i>
	<i>Fissidens crasipes</i>		<i>Potamogetón nodosus</i>
			<i>P. crispus</i>
			<i>Myriophyllum</i>
Macroinvertebrados			<i>verticillatum</i>
			<i>Callitriche sp.</i>
	<i>Baetis vardarensis</i>	<i>Chironomus sp.</i>	<i>Baetis fuscatus</i>
	<i>Ecdyonurus lateralis</i>	<i>Tubificidae</i>	<i>Ephemerella mesoleuca</i>
	<i>Ephemerella Ígnita</i>		<i>Caenis luctuosa</i>
	<i>Rhyacophila evoluta</i>		<i>Hydropsyche exocellata</i>
	<i>R. dorsalis</i>		<i>H. siltalai</i>
	<i>Simulium ornatum</i>		<i>Cheumatopsyche lepida</i>
			<i>Psychomyia pusilla</i>
			<i>Simulium</i>
			<i>erythrocephalum</i>
<hr/>			
Conductividad del agua (media anual)	260 µS/cm	560 µS/cm	350 µS/cm

Tabla 4. El efecto de la cadena de embalses del río Ter en la mejora de la calidad del agua —que se pone de manifiesto en la disminución de la conductividad y de la mineralización (SABATER, 1987)— se traduce en un cambio de las comunidades de organismos (De PUIG *et al*, 1987.)

5.1.4. El embalse como ejemplo de transformación del medio por el hombre

Veamos como ejemplo el caso de la gigantesca presa de Asuán, en el río Nilo, construida siguiendo la tradición del colonialismo piramidal egipcio para dedicarla a la irrigación y a la producción de energía eléctrica. Ahora los egipcios disponen de cuatro cultivos en rotación en lugar de uno. Sin embargo, los canales han extendido la posibilidad de bilharziosis, que en

la actualidad infecta hasta el total de la población campesina en algunas zonas; los materiales en suspensión quedan retenidos en la presa, con lo que desaparece la fertilización natural y se colmata el pantano, aparte de empobrecerse el suelo; ha aumentado la salinidad de las aguas por la evaporación del agua antes de salir de la presa, y se han perdido importantes pesquerías en la desembocadura de las aguas del Nilo en el Mediterráneo.

En este tema, como en tantos otros, se pone de relieve la necesidad de una colaboración más estrecha entre técnicos y científicos.

5.2. UN ECOSISTEMA ANTROPOSFERICO TERRESTRE: EL AGROECOSISTEMA

Aproximadamente el 10% de la tierra libre de hielo está cultivado, y otro 20% está constituido por pastos, dedicados a la explotación animal más que a la producción vegetal. Es decir, aproximadamente el 30% de la superficie continental está constituido por agroecosistemas en su más amplio sentido, que representan la mejor tierra disponible para estos usos agrícolas. Ampliarlos sólo será posible a un mayor coste y desarrollando nuevos tipos de agroecosistemas.

Simplificando, los agroecosistemas se clasifican en dos grandes grupos: los de agricultura preindustrial —autosuficientes con la ayuda del trabajo animal o humano—, que proveen de alimentos para la familia y el trueque en el mercado local, y los de agricultura intensiva, mecanizada y nutrida con fertilizantes, cuyos productos se destinan a la comercialización y exportación, constituyéndose en importantes factores económicos. Una gran proporción de los agroecosistemas actuales (60%) son aún del tipo preindustrial. En su mayor parte se hallan en los países subdesarrollados, adaptados a las condiciones edáficas y climáticas y agrupados en tres-grandes tipos: el de pastoreo, el de agricultura errante (que se traslada cuando se agotan los nutrientes) el de agricultura permanente (basado en la irrigación, natural por grandes avenidas de agua a lo largo

de ríos y deltas o artificial mediante canales). Estos sistemas que calificamos de primitivos son, sin embargo, mucho más eficientes por unidad de energía empleada que los agroecosistemas mecanizados, en una manifestación más de la ley de rendimientos decrecientes, aunque, eso sí, son menos productivos. Los mecanizados se basan en las nuevas tecnologías genéticas, económicas, químicas (plaguicidas y fertilizantes) y energéticas, y proporcionan temporalmente un respiro en la carrera entre el crecimiento de la población y la producción de alimentos. El uso de energía externa al sistema llega a tal extremo que Margalef apunta que puede que se dedique más energía a mantener alterados los sistemas naturales, frenando su tendencia a la complejidad —a la elaboración de «obras de arte»—, y a evitar los consumidores ajenos (las plagas), que a estimular el crecimiento de las plantas con agua y fertilizantes. Este autor llega a afirmar que la agricultura actual se está convirtiendo en una «técnica de conversión de la energía del petróleo en energía de los alimentos».

La característica fundamental de los ecosistemas agrícolas es la dependencia energética y la salida de material hacia regiones distantes, hacia otros ecosistemas antroposféricos: las ciudades. A diferencia de éstas, los agroecosistemas tienen un componente autotrófico. También difieren de los ecosistemas biosféricos, como los bosques o los lagos, puesto que la energía auxiliar subsidiaria de la solar —trabajo humano y animal, fertilizantes, pesticidas, irrigación, maquinaria, etc.— está bajo el control del hombre, la diversidad de los organismos es reducida para maximizar la producción de un producto específico y las plantas (o los animales) están bajo selección artificial más que bajo selección natural. Además de los innegables —desde el punto de vista antroposférico— beneficios, existen también costes manifiestos: la erosión del suelo, la polución por pesticidas y fertilizantes, el enorme gasto energético de combustibles perecederos y una mayor vulnerabilidad a los cambios climáticos y a las plagas.

Esta pequeña enumeración de problemas generados por la capa antroposférica en uno de sus sistemas, el agrícola, nos lleva a los temas que más preocupan a la sociedad humana,

aquellos que han introducido «la ecología», en la mayoría de los casos de forma muy poco rigurosa, en los medios de comunicación y en los discursos de los políticos. En los capítulos siguientes vamos a tratar los que creo más importantes, junto a otros que a pesar de no serlo quizá tanto, han merecido mucha atención en los últimos años.

5.3. ECOLOGIA Y DEMOGRAFIA. PROBLEMAS CUANTITATIVOS Y CUALITATIVOS

El origen de la mayor parte de los actuales problemas ecológicos se halla en el incremento de la población y de su consumo de energía.

Durante el último centenar de años, la población humana ha aumentado de manera acelerada, como consecuencia de los progresos científicos y tecnológicos que han conducido a un aumento exponencial del uso de energía. Entre los que han desempeñado un mayor papel se hallan sin duda los médicos, que han hecho posible el tratamiento de enfermedades que mantenían unas vidas medias muy inferiores a la actual hace tan solo cien años (tabla 5). El progreso ha surgido principalmente como resultado de los adelantos conseguidos en la química orgánica, los anestésicos —y la moderna cirugía—, los analgésicos, los antidepresivos, los antibióticos, las vacunas, los sueros defensivos, los anticuerpos monoclonales, etc.

Pero, aun así, de momento, más que un problema cuantitativo, que aún no acucia —sí lo hará si mañana seguimos creciendo al ritmo actual, aunque es bueno recordar que sólo se crece mientras se puede—, son los problemas cualitativos de disponibilidad de energía, alimentos e infraestructura (organización e información) los más preocupantes. Otra fuente potencial de conflictos cualitativos es el envejecimiento de la sociedad y la coexistencia de diferentes generaciones, fenómeno éste producido por el alargamiento de la vida media y el mantenimiento de la duración media de cada generación alrededor de los veinticinco o treinta años.

<i>Años</i>	<i>Campaña</i>	<i>Relación muertos por acción de gue- rra/muertos por en- fermedad</i>
1793-1815	Guerras anglo-francesas, ejército inglés	1 : 7,6
1828-1829	Guerra ruso-turca, ejército ruso	1 : 5,5
1845-1856	Guerra de Crimea, ejército francés	1 : 3,7
1899-1902	Guerra bóer. ejército inglés	1 : 1,9
1904-1905	Guerra ruso-japonesa, ejército ruso	1 : 0,4
1914-1918	Primera guerra mundial, ejército alemán	1 : 0,1

Tabla 5. Comparación del número de muertos por causa específicamente bélica con el de muertos por enfermedad en diversas campañas militares, que demuestra el papel de los avances médicos del último siglo. (De ELKIN, 1961.)

5.3.1. La antroposfera y la energía exosomática

La vida del hombre actual no depende solamente de la energía endosomática (necesaria para el metabolismo), sino también de la exosomática o externa, que es la que le proporciona iluminación, calefacción, refrigeración, suministro de agua, transporte, industria. etc. El consumo de esta energía, que ya en las sociedades primitivas doblaba a la endosomática al utilizar leña para cocinar y calentarse, ha aumentado considerablemente en la sociedades modernas hasta hacerse diez veces e incluso, en algunas sociedades más avanzadas y ricas, como la americana, cien veces superior a la endosomática (fig. 39). Además, y al contrario que ésta, la energía exosomática no está sujeta a límites biológicos y tiende a aumentarse a sí misma. Como fácilmente se deduce, su consumo es proporcional a la renta per cápita.

Una gran parte de la energía externa se invierte en el transporte, y éste está muy ligado a la organización del espacio. Existen dos tendencias posibles, la diversificación y la concentración, que se pueden resumir con las famosas frases «lo pequeño es hermoso» (SCHUMACHER, 1973) y «lo grande es poderoso» (MARGALEF, 1979). Esta dinámica poblacional y energética ha generado problemas demográficos, alimentarios y de contaminación y erosión.

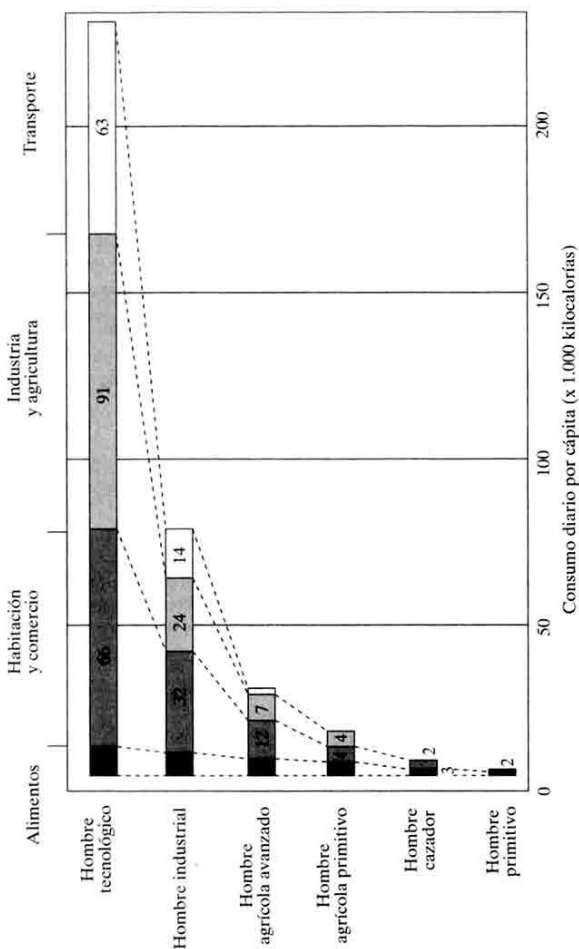


Fig. 39. Evolución humana y consumo de energía. (De GONZÁLEZ CABRÉ. 1978.)

La antroposfera explota la madera para cocinar y calentarse, arruinando así muchas comunidades vegetales, principalmente en los países áridos, en los que el crecimiento es lento y acusa especialmente la explotación. Pero donde la explotación

adquiere mayor potencial es en el uso de los otros tipos de energía exosomática: la eléctrica —procedente del Sol a través de la evaporación, la lluvia y los ríos—, la del carbón y el petróleo —antiguamente energía interna asimilada por los vegetales—, la nuclear, etc. Es el uso de esta energía exosomática lo que ha dado al hombre su extraordinario poder.

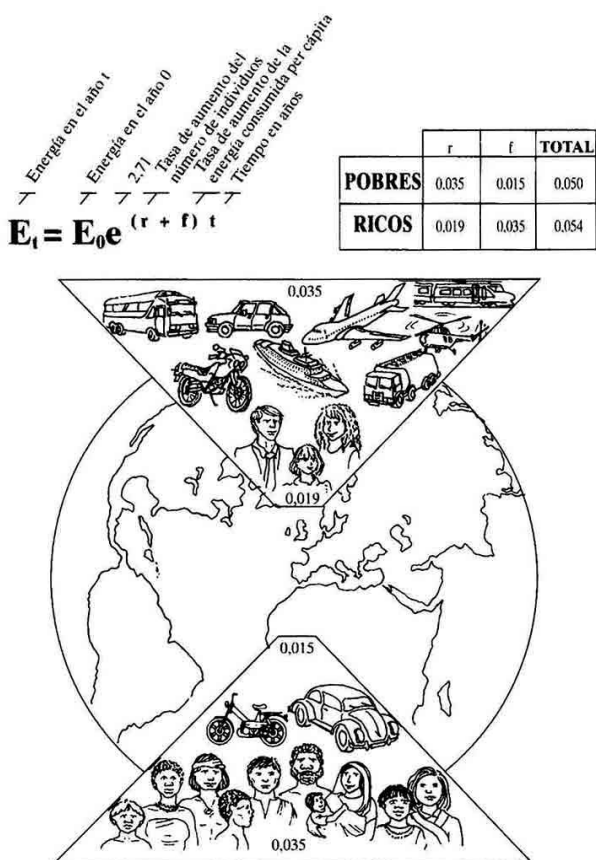


Fig. 40. Diversidad en el aumento del consumo de energía en los países ricos y en los pobres, que acrecienta progresivamente las diferencias. (De MARGALES 1985.)

El aumento exponencial del consumo de energía por parte de la humanidad se descompone de forma diferente según los países. De manera aproximada, mientras que en los avanzados tres cuartas partes de la tasa de aumento se deben al incremento de energía utilizada por persona y una cuarta parte al incremento de población, en los subdesarrollados las proporciones son inversas (fig. 40). El progresivo enriquecimiento de unos y empobrecimiento de otros puede generar problemas más graves que la posible escasez de fuentes de energía. Esta diferencia se manifiesta en otras muchas características, como por ejemplo la aparición de estrategias evolutivas divergentes en diferentes grupos humanos, al establecerse presiones selectivas diferenciadoras sobre caracteres tales como los defectos de la vista o del metabolismo, que son evolutivamente neutros en los países desarrollados y que aún pesan en los subdesarrollados —quizá ya hemos llegado al punto en que muchos de nosotros, los del primer mundo, difícilmente podríamos competir en condiciones naturales con los del tercer mundo.

5.3.2. La producción de alimentos. ¿Cómo alimentar la creciente antroposfera?

El hombre ha nacido en la biosfera y de la biosfera, y de ella depende para obtener su alimento y muchos otros de sus recursos.

La biomasa de la biosfera se puede estimar en doscientos cincuenta mil millones de toneladas de carbono, y la de la antroposfera en veinte millones como mínimo. Las necesidades alimentarias antroposféricas oscilan alrededor de cuatrocientos millones de toneladas anuales, lo que representa sólo el 0,5% de la producción primaria neta de la biosfera. Pero en realidad sólo se consume una parte de la producción agrícola, y mucha se pierde. Además, la antroposfera como carne, y el factor de conversión para pasar de producción vegetal a animal es, como ya hemos visto, de 1/10:1 kg de carne proviene, en términos medios aproximados, de 10 kg de hierba o de grano.

<i>Región</i>	<i>Número de países</i>	<i>Población (millones)</i>		<i>Tasa de Crecimiento anual (%)</i>	<i>Tiempo en que se dobla (años)</i>
		1982	2000		
África					
Norte	6	117	190	3,1	22
Oeste	16	150	265	3,0	23
Este	17	141	246	3,0	23
Centro	9	56	90	2,6	27
Sur	5	34	55	2,5	28
Total	53	498	846	2,9	24
Asia					
Sudoeste	16	106	171	2,7	26
Centro-Sur	9	988	1396	2,2	32
Sudeste	11	374	519	2,2	32
Este	8	1204	1441	1,4	50
Total	44	2672	3527	1,9	37
América					
Norte	2	256	286	0,7	95
Centro	8	95	142	2,6	26
Caribe	16	30	41	1,8	38
Sur					
Tropical	9	209	313	2,4	28
Templado	3	43	53	1,5	45
Total	38	633	835	1,7	41
Europa	27	488	511	0,4	187
URSS	1	270	302	0,8	88
Oceania	8	24	30	1,3	55
Mundo					
Más desarrollado		1152	1248	0,6	116
Menos desarrollado		3434	4835	2,1	33
Total		4586	6083	1,7	40

Tabla 6. Población de las grandes regiones del planeta y estimaciones para el año 2000. (De diversas fuentes, en SCHNEIDER y LONDER. 1984.)

La producción primaria de las plantas, base de la vida, es limitada. En conjunto, menos del 1% de la energía solar que llega a la Tierra se invierte en la síntesis de carbono orgánico y otros materiales. La principal limitación, establecida ya en los primeros momentos de la evolución vegetal, radica en el apantallamiento de las clorofilas: de 200 a 300 moléculas por cada centro de reacción (fig. 18). Incluso los elementos foto-voltaicos consiguen una eficiencia superior (15%) a la de los vegetales, que han evolucionado en un mundo en el que la luz no era limitante.

Los sistemas explotados se renuevan a una velocidad mayor que los dejados a sí mismos. Los ecosistemas viejos y ricamente estructurados no son aptos para la aceleración generada

por la explotación humana. De ahí que los bosques tropicales o los arrecifes de coral se comporten muy frágilmente ante ella. Son los paradigmas del contraste entre la antroposfera y la biosfera.

Han surgido muchas ilusiones de aumentar la producción primaria en beneficio del hombre, pero en la mayoría de los casos están lejos de materializarse.

La reciente revolución verde, que ha elevado enormemente la producción agrícola, surgió de la aplicación rigurosa del método científico y de la producción de híbridos de alto rendimiento. El siguiente paso será la aplicación masiva de la biotecnología moderna, que incluye la ingeniería genética.

5.3.2.1. La esperanza de la ingeniería genética

La ingeniería genética, que luego consideraremos con más detalle, es en este campo sólo una esperanza. Uno de los objetivos que persigue con mayor interés es la introducción de los genes que codifican la fijación del nitrógeno atmosférico en las plantas, cosa difícil de conseguir porque se trata de un sistema multigénico (17 genes o más). Además, cuando se consiga, se deberá estudiar si compensa el alto precio energético (del 20% al 30% de la producción) que las plantas deberán pagar. En todo caso, desde el punto de vista global del planeta, su introducción no parece que tenga demasiada trascendencia.

5.3.2.2. ¿Son los océanos la despensa milagrosa?

Tampoco se puede considerar a los océanos como la despensa del planeta. Por unidad de superficie producen tres veces menos que los continentes. Además, muy raramente se utilizan los productos primarios de manera directa y, por consiguiente, disminuye la energía recuperada al explotar los siguientes niveles tróficos de la cadena alimentaria —los peces—, dado que en cada uno de los eslabones se pierde el 90% de la energía. Por otra parte, la pesca es una actividad energéticamente cara (navegación, congelación, transporte, etc.), de manera que su futuro es atractivo sólo en el caso de los países ricos en energía, o con salarios bajos, o por razones políticas. Las esperanzas de

aumentar la producción mediante cultivos se han visto realizadas sólo en el caso de productos de precio muy elevado, como los langostinos, las ostras, etc., pues requieren la introducción de mucha energía; además, en buena lógica, una utilización adecuada de las diversas formas de energía exigiría usar una extensión mínima de considerable magnitud, más de 10 km².

5.3.2.3. *Las microalgas, ¿un nuevo cultivo?*

Se estudian también los cultivos de algas unicelulares, que pueden llegar a cuadruplicar la masa inicial en un día, pero a las que se debe suministrar nutrientes para mantener ese ritmo, y también hay que retirar el material producido, todo lo cual comporta asimismo un alto coste energético. Veamos con un poco de detalle, y como ejemplo de estas posibles alternativas de aumento de la producción, las posibilidades del cultivo de microalgas.

La necesidad de alimentos y materias primas para la industria, junto con la limitación de tierras cultivables y la escasez de derivados del petróleo, ha sido lo que ha llevado a la búsqueda de nuevas fuentes agrícolas y energéticas. Así, entre otros, ha surgido el interés por la obtención de esta biomasa microalgal.

Las microalgas crecen en cualquier medio acuático que posea nutrientes, esté iluminado y tenga una temperatura adecuada, convirtiendo la energía solar en biomasa. Se pueden cultivar en recintos cerrados o al aire libre. En el primer caso, las condiciones son análogas a las de los fermentadores industriales y por lo tanto, conllevan un coste elevado, sólo justificado cuando el producto se destina al consumo humano (Japón). En el segundo, perfilado como un nuevo tipo de cultivo, se presentan dos opciones según el tipo de medio que se utilice: aguas limpias a las que se añaden nutrientes minerales en condiciones bien controladas, o aguas residuales (municipales o agropecuarias) en condiciones no tan bien controladas, con una importante flora bacteriana. Entre las numerosas diferencias es especialmente notable la necesidad de añadir fuentes de carbono, CO₂ y bicarbonato, o bien uno u otro, a las aguas limpias, lo que encarece el proceso sobremanera.

Con este nuevo cultivo agrícola, y en el mejor de los casos, se espera obtener de cincuenta y cinco a ciento diez toneladas de materia seca por hectárea y año, lo que representa una eficacia del 1,8% al 3,6% en el aprovechamiento de la irradiación solar total, comparable a la de los cultivos más productivos de plantas C₄, como la caña de azúcar o el maíz, y con muchas más proteínas y lípidos que éstas, en las que predominan los carbohidratos, la celulosa y las ligninas.

Alimentos, depuradoras y fuente de materias primas

Las microalgas producto de este cultivo son utilizadas para la alimentación humana sólo en casos excepcionales, como en el Chad y la India cuando escasean los alimentos tradicionales, o como producto sanitario —en Japón, China y otros países—. Persisten empero muchos problemas de toxicidad, costumbres alimentarias adversas y coste elevado. En la alimentación animal presenta mejores perspectivas, ya que se pueden utilizar aguas residuales con menor reparo, con lo que se disminuye el coste y se obtiene el beneficio adicional de la depuración de las aguas. De todos modos, y a pesar de su alto valor proteico, el elevado porcentaje de ácidos nucleicos obliga a reducir su proporción en los preparados alimenticios a menos del 25%. En lo que el cultivo de microalgas tiene una aplicación inmediata es en acuicultura, como alimento natural de peces y mariscos.

Se han obtenido resultados prometedores, especialmente en California e Israel, en su aplicación al tratamiento de aguas residuales, no sólo agrícolas sino también de aglomeración urbanas de hasta 30.000 habitantes.

Otro campo en el que las microalgas ofrecen prometedoras posibilidades es el de las industrias química, alimentaria y farmacéutica, por ser fuente de fertilizantes (algunas microalgas son capaces de fijar el nitrógeno atmosférico), condicionadores del suelo (aumentan su capacidad acuosa), productos tensioactivos, plastificantes, cosméticos, ácidos orgánicos, alcoholes, aldehídos, terpenos, fenoles, antibióticos, vitaminas, antioxidantes, colorantes, sazonzadores, aminoácidos, etc.

Incluso se pensó en utilizarlas como componentes centrales de sistemas de biorregeneración de oxígeno y alimentos en las

misiones espaciales de la NASA; pero finalmente fueron sustituidas por sistemas abióticos más fiables. Ahora parecen cobrar un renovado interés para las estaciones orbitales, donde los astronautas van a pasar largos períodos de tiempo.

No parece importante, por lo menos de momento, su utilización como fuente inmediata de energía, por razones económicas y de espacio.

Limitaciones

Persisten aún varios problemas que han impedido la aplicación y generalización de este cultivo en zonas soleadas, como las de España. La presencia de depredadores y parásitos no puede controlarse, a menos que se utilicen plaguicidas, cosa indeseable porque se incorporan al producto. Sólo los cultivos en condiciones extremas, como *Spirulina* en aguas alcalinas o *Dunaliella* en aguas hipersalinas, se salvan de este problema. El suministro de nutrientes a gran escala resulta caro y además presenta posibles problemas de contaminación. La recolección es costosa cuando se lleva a cabo por centrifugación, o poco eficaz cuando se realiza por sedimentación o por flotación, los otros métodos empleados. En definitiva, el montaje de este nuevo cultivo representa algo parecido a la construcción de un árbol, estructura surgida en la evolución hace ya muchos milenios. Esta reflexión mueve al escepticismo sobre excesivas esperanzas en sus posibilidades.

Todo ello conduce a que la producción microalgal al aire libre se presente prometedora a corto plazo sólo cuando se obtiene como proceso secundario, como en el caso de *Spirulina* en la producción de carbonatos en México o como la obtenida en el tratamiento de aguas residuales en Israel, California y la India, o cuando se realiza una explotación multiuso de la biomasa, como en el caso de la *Dunaliella salina*, de la que se extraen glicerol, lípidos, betacaroteno y proteínas.

5.3.2.4. La explotación de los detritívoros

Existen otras actuaciones racionales posibles para paliar el problema de la alimentación de la antroposfera. Una de ellas,

no contrariada por ninguna razón de peso, es que los seres humanos llevemos a cabo la explotación de la cadena alimentaria de los detritívoros (fig. 41) para obtener alimento y otros productos. La estrategia de la agricultura actual se basa en seleccionar plantas de rápido crecimiento y comestibilidad, lo que las hace vulnerables a los insectos y a las enfermedades. Cuanto más se seleccionan en este sentido, más se debe invertir en pesticidas, lo que aumenta la posibilidad de envenenar a otros organismos y a nosotros mismos. De ahí el posible interés de una agricultura de plantas que pudieran usar sus propias defensas químicas. Aunque no fuesen deliciosas, podrían darse como alimento a los propios descomponedores, de los que luego comeríamos. Ya se han dado pasos en este sentido, del que no están alejados el cultivo de microalgas que hemos visto o el de peces detritívoros.

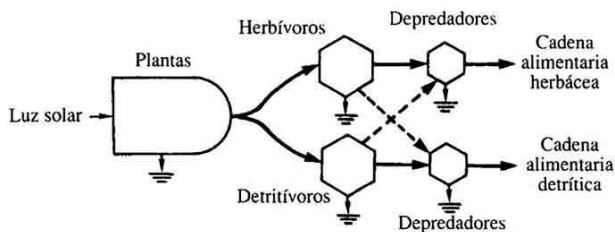


Fig. 41. Una posible vía de obtención de nuevos alimentos es la explotación de la cadena alimentaria detritívora.

De todo lo expuesto parece deducirse, por lo menos hasta el momento, que no es previsible un aumento sustancial de la productividad primaria ni con estas alternativas. Sin embargo, cabe preguntarse sobre la necesidad de este aumento cuando el metabolismo endosomático de los hombres (el consumo de cada ser humano es el mismo que el de una bombilla de 120 vatios) representa ese menos del 0,5% de la producción primaria total de la Tierra y cuando la mayor parte de lo producido por la agricultura no es consumido por el hombre sino por las plagas y la ganadería, o eliminado como excedentes —que cuando escribo estas líneas, están provocando enormes quebraderos de cabeza a los políticos europeos—. En el mundo hay

más animales domésticos que personas y, además, individualmente consumen más alimentos que ellas. Y por si fuera poco, están los numerosísimos animales de compañía.

Por ahora, la ayuda tecnológica nos ha proporcionado un respiro en la carrera entre el aumento de la antroposfera y los recursos de que dispone. Puede llegar a «faltar de nuevo el aire» cuando el coste de la energía subsidiaria vuelva a aumentar, a medida que se acrecienta las diferencias entre países ricos exportadores y pobres importadores, y por supuesto, a medida que aumente la población, cosa que ocurre de modo especialmente acelerado en los ya deficitarios países pobres (véase el capítulo 8). Entonces se tendrá que echar mano de ese 99,5% de producción primaria total de la Tierra que resta por explotar o se tendrá que usar más eficazmente ese 0,5% actual. Todo ello requiere decisión, estudio y trabajo y consumo de energía cada vez de forma menos eficiente y por lo tanto más costosa.

VI. LA ANTROPOSFERA ACTÚA SOBRE EL CANAL ECOLÓGICO DE LA BIOSFERA

Algunos aspectos de la actuación de la antroposfera sobre la biosfera y las otras capas del planeta han preocupado más que otros a los miembros pensantes de la propia antroposfera. Entre estos temas, pomposamente llamados de impacto ambiental, hay algunos que han preocupado especialmente estos últimos años: los problemas de degradación de los venenos químicos utilizados (con el famoso caso del DDT), la resistencia a los plaguicidas que se genera, los posibles cambios climáticos de origen antrópico, la erosión, etc. En los apartados siguientes no están todos los que son, ni son todos los que están, pero son lo que por razones personales, influidas sin duda por el azar y las circunstancias, más me han preocupada. En las tablas 7 y 8 el lector interesado encontrará una lista bastante exhaustiva de los efectos del «impacto» antroposférico sobre los ecosistemas acuáticos y atmosféricos.

6.1. EROSIÓN

Sobre la problemática y control de la contaminación se ha publicado una amplia literatura, pero quizá más grave que el de la polución sea el problema de la erosión, que ha desertizado más del 25% de las tierras del globo. Los causantes son la deforestación, la agricultura inadecuada —por el tipo de cultivo o por el regadío—, el pastoreo excesivo, la construcción de caminos y carreteras, etc., que posibilitan que el impacto de las lluvias, del viento, de los cambios de temperatura y de ciertas reacciones químicas conduzca a la desaparición del suelo. Y sin suelo, no puede haber ni cultivos ni bosques.

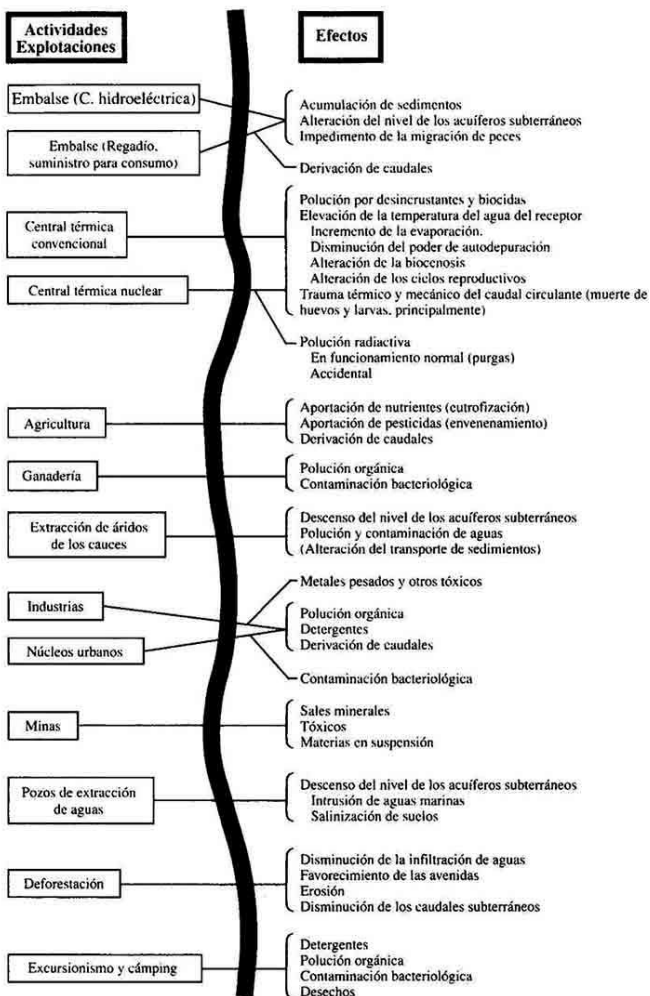


Tabla 7. Esquema resumen de las actividades antroposféricas que causan un impacto sobre los ecosistemas biosféricos acuáticos. (De GONZÁLEZ CABRÉ. 1978.)

Fuentes más importantes de polución atmosférica

Clasificación por procesos

<i>Proceso</i>	<i>Polución en forma de aerosoles</i>	<i>Polución en forma de gases y vapores</i>	<i>Aproximaciones cuantitativas (emisiones)</i>
<i>Combustión en instalaciones fijas</i>	Polvos	NO ₂ , SO ₂ , CO. Ácidos, compuestos orgánicos, cenizas volantes.	0,5 a 1,5% del peso de combustible quemado. 90% del azufre del carbón sale como SO, (1-2%) y como SO ₂ (98-99%).
<i>Motores de automóvil</i>	Humos	Hg. Pb, As, Rd y otros isótopos. NO ₂ , CO. Ácidos, compuestos orgánicos, hidrocarburos.	4 a 7% del peso de gasolina (hidrocarburos) consumida.
<i>Industrias petrolíferas</i>	Polvos Fangos Humos	SO ₂ . H ₂ S, NH ₃ , CO. Hidrocarburos. mercaptanos	0,25 a 1,5% del peso de sustancias tratadas.
<i>Industria química</i>	Polvos Fangos Humos Pulverizaciones	SO ₂ , CO, NH ₃ Ácidos, compuestos orgánicos, disolventes, compuestos pestilentes, sulfuros. (Gran variedad, según el proceso.)	0,5 a 2% del peso de sustancias tratadas.
<i>Termometalurgia y electrometalurgia</i>	Polvos Humos	SO ₂ . CO. Fluoruros, compuestos orgánicos	0,5 a 2% del peso de sustancias tratadas.
<i>Tratamiento de los productos de la minería</i>	Polvos Humos	SO ₂ , CO. Fluoruros, compuestos orgánicos. (Gran variedad de emisiones, según el proceso.)	1 a 3% del peso de sustancias tratadas.
<i>Industrias alimentarias</i>	Polvos Humos	Sustancias odorantes.	0,25 a 1% del peso de sustancias tratadas
<i>Incineración de basuras</i>	Polvos Humos	SO ₂ . SO ₃ . ClH. Ácidos orgánicos.	0.6 a 2% del peso de basuras incineradas.

Clasificación por polucionantes

Contaminante	Fuente	Efectos
Óxidos de azufre SO_2 , SO_3	Combustión de carbones y petróleos: — Automóviles. — Calderas de calefacción. — Centrales térmicas. — Otras instalaciones industriales. — Explotación y manipulación de ciertos minerales de azufre. — Fabricación de papel, cartón, ácido sulfúrico y ciertos productos sintéticos.	Atmósfera húmeda → formación de ácido sulfúrico: deterioro de cultivos e irritación de las mucosas. El SO_2 irrita intensamente los ojos y las vías respiratorias superiores, y produce tos, opresión respiratoria y espasmos de la laringe.
Sulfuros y mercaptanos $\text{S}^=$ $\text{R}-\text{SH}$	Refinerías. Ciertos procesos industriales. Putrefacción de aguas y de desechos. Fabricación de pasta de madera y papel, curtidos, fabricación de colorantes.	Pestilencia. Tóxico.
Monóxido de carbono CO	Combustiones incompletas. — Motores de gasolina. — Centrales eléctricas. — Acererías. — Calefacciones mal reguladas. — Humo de cigarrillos.	Tóxico. Interfiere el transporte de oxígeno por la sangre. Lasitud, dolor de cabeza y alteraciones en la coordinación motora.
Anhídrido carbónico CO_2	Combustión de productos orgánicos.	El progresivo aumento de la concentración de CO_2 en el aire puede alterar el clima a escala planetaria.
Hidrocarburos	Combustión. Motores de gasolina. Evaporación en zonas pantanosas y petrolíferas.	Intervienen en la formación del <i>smog</i> oxidante Agentes carcinógenos.
Ozono O_3	Reacciones fotoquímicas de oxidación del SO_2 o de transformación del NO_2 en NO . Típicas de las zonas urbanas (tráfico intenso).	Factor decisivo en la aparición del <i>smog</i> y sus efectos. El ozono es por sí mismo un oxidante muy enérgico con notables efectos antibióticos. Sus efectos directos sobre el organismo humano no han sido bien aclarados.
Óxidos de nitrógeno NO_2 , NO	Procesos de combustión a temperaturas elevadas (superiores a 1.000°C): — Motores de combustión interna, especialmente los diésel. — Centrales eléctricas. — Fábricas de explosivos. Típico de zonas urbanas. Volcanes y tempestades.	Papel importante en la aparición del <i>smog</i> . NO_2 : Enfermedades de las vías respiratorias, ya que facilita su infección. Es tóxico para cierto número de especies animales.

<i>Mercurio</i> Hg	Evaporación de la corteza terrestre, acelerador para la minería, construcción, agricultura, etc.	Tóxico.
<i>Fluoruros</i> F ⁼	Yacimientos de fluorina. Industrias de: — cerámica. — alfarería; — fabricación de abonos; — obtención de aluminio.	El ión F ⁼ posee una gran actividad fisiológica y un intenso poder corrosivo en atmósfera húmeda. Se acumula especialmente en la hierba y se almacena sobre todo en los huesos de los organismos jóvenes. También puede producir una disminución de hemoglobina en la sangre de los niños. En los rebaños (vacas), produce una inflamación de las articulaciones muy dolorosa y el animal acaba no pudiendo casi moverse ni comer.
<i>Polvo</i>	Erosión eólica. Terremotos y volcanes. Minería. Agricultura. Industria (cemento). Erosión de las carreteras.	<i>No tóxico:</i> Enfermedades respiratorias (fibrosis, alergias y cáncer pulmonar). <i>Tóxico:</i> Intoxicación general, dermatosis, alergias, cáncer.
<i>Sílice</i>	Explotación y manipulación de minerales.	Las partículas de $0 < 5 \mu$ se acumulan en los pulmones, donde se forman nódulos y aparece una fibrosis que provoca el enfisema (reducción progresiva de la función pulmonar).
<i>Amianto</i>	Explotación y manipulación del amianto: — Fibrocemento. — Tejidos incombustibles.	Fibrosis pulmonar, mesotelioma, placas pleurales, cáncer pulmonar, disnea, expectoración, bronquitis, dolores torácicos.

Tabla 8. Contaminantes, fuentes y efectos más importantes de polución atmosférica. (De ROSE *et al*, *Monografía OMS*. núm. 46. en GONZÁLEZ CABRÉ. 1978.)

La erosión ocurre principalmente y de forma más preocupante en las regiones con intensas precipitaciones y superficies inclinadas que se han visto desprovistas de sus cubiertas vegetales protectoras (tabla 9). Constituyen ejemplos claros las laderas del Himalaya o, a menor escala, pero muy didácticas, las abiertas en la construcción de nuestras autopistas —todos las hemos visto, aunque sea distraídamente, desde la ventanilla de

nuestros raudos automóviles—. Muchos consideran que la erosión es nuestro mayor problema ambiental a largo plazo, pues el suelo se regenera mucho más despacio que se elimina. En pocos años éste será uno de los principales puntos de la agenda política en los países desarrollados.

<i>Características del suelo y de la cubierta vegetal</i>	<i>Tasa anual de erosión</i>	
	<i>mm</i>	<i>t/ha</i>
Casi plano		
Algodón	4,00	80
Cosechas anuales	1,60	32
Pastos densos	0,10 a 0,50	2 a 10
Pastos abiertos	1,00 a 10,00	20 a 200
Ondulado, pendiente moderada		
Bosque, plantación	0,10 a 0,50	0,2 a 10
Arbolado espaciado	0,01 a 0,50	2 a 10
Arbolado denso	1,00 a 8,00	20 a 160
Pendiente moderada a pronunciada		
Bosque	0,50 a 2,00	10 a 40
Cultivos migratorios y abandono	30,00 a 60,00	600 a 1.200

Tabla 9. Tasas anuales de erosión según las características del suelo y la cobertura vegetal. (Datos de BURGOS, 1979.)

6.2. CONTAMINACIÓN

El término contaminación o polución difícilmente puede ser considerado como científico. Se ha definido como una alteración desfavorable del medio, de las vías de circulación de la materia, de la energía, de los organismos; pero el adjetivo «desfavorable» sólo tiene sentido en el contexto de su utilización (TERRADAS, 1971). Esas alteraciones nos exponen a diversos peligros, que van desde la falta de agua potable a los cambios climáticos, pasando por la pérdida de alimentos, las epidemias, las enfermedades cardiovasculares y respiratorias, las sustancias tóxicas y radiactivas, etcétera.

Y sin embargo, la vida avanza dejando atrás una larguísima cola de moléculas orgánicas de todo tipo: la «contaminación no ha sido pues inventada por el hombre» (MARGALEF. 1969). «La contaminación no es producto de la baja moral de la sociedad humana» (LOVELOCK. 1983), no es sino una consecuencia inevitable del desarrollo de la vida y de la segunda ley de

la termodinámica, que establece claramente que el bajo nivel de entropía (aproximadamente igual a desorden) y la intrincada organización dinámica de los seres vivos exige la excreción al entorno de productos y energía degradados. Como todos los organismos vivientes, el hombre retorna al medio materia orgánica —excrementos y cadáveres— que entra en el reciclaje normal. El problema aparece cuando la población se acumula, y se acrecienta especialmente con el enorme uso de energía exosomática. Se generan muchos desperdicios y el hombre no quiere pagar el precio del retorno a los lejanos lugares de origen del material utilizado. La contaminación va, pues, ligada al problema de ese retorno. Cuando no se lleva a cabo, se rompe el equilibrio natural puesto que la producción y la actividad descomponedora de los organismos son proporcionales a la superficie de la tierra donde se desarrollan. Cuando los desechos abandonados en un lugar corresponden a la producción primaria de un área mucho mayor, los mecanismos de descomposición no consiguen dar abasto. Además, el hombre produce actualmente numerosas sustancias no biodegradables que no pueden ser recicladas en los circuitos biosféricos.

Aunque cuando hablamos de contaminación y daño a la naturaleza pensamos en las zonas industriales y en las grandes ciudades, no se debe olvidar que cuando el hombre industrial urbano hace algo ecológicamente incorrecto lo percibe e intenta corregirlo (cuando escribo estas líneas las páginas de los periódicos van llenas de fotografías del accidental y catastrófico vertido de sustancias tóxicas al Rin). No ocurre así en los trópicos ni en los mares próximos a los litorales de los continentes. Y ahí es donde el daño puede ser realmente irreparable.

6.3. LA ANTROPOSFERA GENERA SUSTANCIAS RECALCITANTES, DE DIFÍCIL DEGRADACIÓN

El estado de las moléculas químicas en la superficie terrestre es en gran parte consecuencia de las actividades de los organismos vivos, que, utilizando la energía solar, mantienen un recambio cíclico de los elementos necesarios para la vida, C,

N, O, P, S, etc., tal como hemos visto en los temas dedicados al estudio de la biosfera.

Cuando una sustancia orgánica, natural o sintética, es introducida en el medio ambiente, experimenta diversas reacciones que pueden ser de origen biológico o no. Sin embargo, las que producen los cambios más importantes son las biodegradantes, las realizadas por organismos vivos. Los seres vivos más activos en esta tarea son las bacterias y los hongos, que, diseminados por el viento y el agua, se encuentran en todas partes y están especialmente capacitados para llevar a cabo dicha función, puesto que son muy pequeños y por lo tanto su relación superficie/volumen es grande, con la consiguiente ventaja para el intercambio de sustratos y productos de excreción entre células y entorno. Asimismo presentan una alta tasa de reproducción y una alta especificidad por los sustratos, las cuales magnifican esa capacidad.

Pero por simple constatación en el ambiente que nos rodea comprobamos cómo, en contra de lo que muchos microbiólogos habían creído, existen sustancias orgánicas que no son fácilmente degradadas y que no sostienen el crecimiento bacteriano o fúngico. Estas sustancias son resistentes a la degradación, son recalcitrantes. La existencia de dichas sustancias no es algo nuevo en la naturaleza, en la que la presión selectiva ha conducido a la síntesis de moléculas especialmente resistentes a los enzimas de los seres vivos para ser utilizadas en los sistemas de transporte y soporte de los vegetales (recordemos la lignina y la celulosa). El hombre no ha inventado nada nuevo, sino que ha plagiado la estrategia y fabrica, por ejemplo, recipientes resistentes de plástico, o pesticidas que, para actuar eficazmente, deben poseer un mínimo de recalcitrancia a la degradación.

Entre las sustancias recalcitrantes a la descomposición existen unas cuantas más conocidas que las demás por su incidencia en el medio ambiente. Los derivados halogenados utilizados en pinturas, refrigerantes e insecticidas destruyen el ozono de la estratosfera, con el consiguiente peligro de aumento de la radiación ultravioleta y de desestabilización del clima (véase 6.5). Los plásticos se acumulan por causa de las

características que los hacen adecuados como recipientes: su maleabilidad, su elasticidad y su resistencia a la degradación. Los alquilbencilsulfonatos (ABS) son los componentes mayoritarios de los detergentes aniónicos, causantes a menudo de las espumas que ensuciaron y afearon nuestros ríos. El petróleo mismo es una sustancia natural de degradación lenta, y la enorme cantidad utilizada y vertida al mar podría llegar a superar la capacidad degradante de los organismos. Su dispersión mediante detergentes, o su hundimiento con arena, no constituyen sino medidas cosméticas, que incluso pueden incrementar su efecto nocivo sobre la vida marina, matando aves, peces e invertebrados, o interfiriendo en la quimiorrecepción y por lo tanto en la alimentación y reproducción. En tierra destruye la vegetación por causa de su toxicidad y por la anoxia y formación de sulfhídrico acompañantes.

Algunas de las sustancias resistentes que sintetiza el hombre no son tóxicas a las concentraciones en que se hallan en el ambiente, en el agua, en el suelo o en la atmósfera, pero su efecto se biomagnifica al acumularse en los tejidos de plantas y animales a medida que se suceden los eslabones tróficos, hasta llegar a causar efectos deletéreos sobre las especies culminantes de la pirámide alimentaria. Además, al no ser destruidas rápidamente, pueden ser transportadas muy lejos del lugar de vertido gracias a la gran capacidad de distribución que tienen las fuerzas atmosféricas (GLOTFELTY *et al.*, 1987).

Se han propuesto diversas explicaciones de la longevidad de estos compuestos recalcitrantes. La evolución biológica sólo habría explorado un estrecho rango de vías bioquímicas, haciendo posible que muchas sustancias sintéticas estén lejos de las vías catabólicas. Si una molécula no puede penetrar en una célula y no es modificada por ningún enzima extracelular, va a ser recalcitrante. Ésta puede ser la razón de que los polietilenos no sufran destrucción microbiana, mientras que sus homólogos, los hidrocarburos alifáticos, que sí penetran, son degradables. Si la concentración de una sustancia es muy baja y su tasa de penetración también lo es, la especie capaz de metabolizarla no la puede aprovechar adecuadamente —no la descompone— y no se replica. Éste es el caso de los compuestos difícilmente

solubles en agua o los que no admiten emulsión, que les permitiría entrar en la célula. La formación de complejos con poliaromáticos resistentes que hacen inaccesibles la parte de la molécula sobre la que actúa el enzima, o los sustituyentes no habituales en la naturaleza, halógenos, nitro, sulfonatos, etc., que se sitúan de manera que impiden la oxidación, también son causa de recalcitrancia. Otros grupos, como los metil, metoxi, carboxil y carbonil son, en cambio, fácilmente eliminables metabólicamente. Los anillos saturados, como por ejemplo el ciclohexano, son más persistentes que sus análogos aromáticos y raramente soportan crecimiento de organismos. También producen resistencia los anillos aromáticos altamente condensados, los enlaces inusuales, con secuencias de carbonos terciarios o cuaternarios, y el excesivo tamaño molecular como el de los plásticos de polietileno y de polivinilo. Otra razón más sutil estriba en la ausencia de inducción del enzima degradativo.

El público en general está concienciado ante el problema, las instituciones estatales de defensa del medio ambiente requieren información, la industria se plantea cuestiones sólo solvables experimentalmente y los científicos universitarios procuran el establecimiento de generalizaciones. Es, pues, de esperar que la colaboración entre estos colectivos dé como fruto el desarrollo de nuevas tecnologías que minimicen la contaminación ambiental y mantengan y aumenten al mismo tiempo los beneficios y las ventajas que las sustancias sintéticas reportan a la sociedad. Sería deseable que cualquier compuesto sintético ampliamente diseminado en la naturaleza fuera susceptible de degradación. Es esperanzador y demostrativo de la plausibilidad de este objetivo el hecho de que cuando el problema se ha hecho acuciante se han buscado y hallado soluciones. Tal es el caso de los alquilbencilsulfonatos ramificados de los detergentes de los años cincuenta, que fueron convertidos en lineales —despojándolos de los carbonos terciarios que impedían la betaoxidación— en los sesenta, eliminando las recalcitrancias que les hacía llenar de espumas los cursos fluviales.

6.3.1. Un ejemplo de racionalidad. Biodegradación del DDT

El número de sustancias sintéticas —actualmente más de dos millones— aumenta cada año en unas doscientas cincuenta mil, de las cuales entre trescientas y quinientas alcanzan el estadio de producción comercial. De la producción global, aproximadamente una tercera parte queda libre en el ambiente, donde persiste largo tiempo sin degradarse.

Entre las más recalcitrantes destacan los plaguicidas y en especial los hidrocarburos clorados, de los que el DDT es el más famoso. La síntesis de estas sustancias se realizó para luchar contra las plagas naturales: insectos, roedores, malas hierbas, etc. Sin embargo, su uso acumulativo y su larga vida (varios años) hacen que los procesos naturales los difundan y trasladen a zonas distintas de las deseadas, dañando a organismos a que no iban destinados. Estos plaguicidas han proliferado de tal forma que en la actualidad pueden hallarse residuos de hidrocarburos clorados en el cuerpo de la mayoría de los organismos vivos, incluido el hombre.

Estas consideraciones, y las expuestas en 6.5.1, llevaron al Gobierno norteamericano a restringir extraordinariamente su uso (a principios de la década de los setenta), medida que no ha dejado de generar polémica, dado que, aunque su peligrosidad para algunas especies de vida salvaje esté clara, no lo está tanto en el caso del hombre, en el que no se conocen casos graves de intoxicación por DDT. A pesar de que su uso ha descendido en Europa y Norteamérica, la producción total sigue aumentando ante la demanda creciente de alimentos, con lo que persiste su potencial peligrosidad ambiental. ¿Y dónde está el secreto de esa recalcitrante persistencia? Pues en la lentitud con que los microorganismos capaces de degradarlo lo catabolizan.

Dichos compuestos sintéticos no son los únicos de difícil biodegradación por los microorganismos. Este es también el caso de muchas sustancias naturales: humus, petróleo, etc. Una de ellas, muy abundante, la lignina, que proporciona el soporte estructural a las plantas leñosas (la madera), presenta una estructura semejante a los plaguicidas organoclorados.

Entre los microorganismos capaces de metabolizar la lignina se incluyen algunas especies de hongos y un pequeño número de bacterias. Uno de tales hongos, el *Phanerochaete*

chrysosporium, cuando crece en cultivos con déficit de nutrientes segrega un sistema enzimático extracelular, dependiente del agua oxigenada, que degrada la lignina. Como la lignina clorada también puede ser degradada por este hongo, un equipo de la Universidad de Michigan ha pensado en la posibilidad de utilizarlo para degradar compuestos organoclorados recalcitrantes tales como el DDT, el HCB, el TCB, el lindano, etc. En efecto, dicho equipo ha obtenido ciertos resultados, entre los que destacan una activación por la glucosa y una inhibición por el nitrógeno, que sugieren que un mismo sistema enzimático puede ser capaz de causar la degradación de la lignina y la del DDT. Este sistema se muestra en alto grado no específico, justamente lo deseable para descontaminar un lugar, dado que la contaminación por un único componente es más la excepción que la regla. Se postula que la evolución de los microorganismos capaces de degradar los compuestos recalcitrantes sólo ocurre en nichos en que su concentración es suficientemente alta para ejercer presión selectiva. Parece además que la capacidad sólo es activada si las concentraciones son también suficientemente altas. Por ello, cuando los contaminantes persistentes se hallan en baja concentración no son biodegradados. El sistema enzimático del *Phanerochaete chrysosporium* es activado por la falta de nitrógeno en el medio de cultivo, por lo que no requiere grandes cantidades de lignina o de DDT para iniciar la biodegradación. Como en la mayoría de los casos, es aquí donde de ciencia básica se puede pasar a ciencia aplicada y pensar en su utilización, bajo concentraciones limitantes de nitrógeno y abundantes carbohidratos, en la destoxificación y eliminación de residuos químicos peligrosos en el tratamiento de aguas residuales y de residuos sólidos (fangos activados, lagunas aireadas, digestiones aerobias). La efectividad de estos sistemas depende, en último término, de los microorganismos presentes. Por eso es muy importante seleccionar los más apropiados, aquellos que posean una más amplia capacidad degradativa y destoxificante.

Existen unas mil setecientas especies de basidiomicetos descomponedores de la madera causantes del reciclado del carbono de la lignina. Es fácil que muchos de ellos sean también

utilizables en la biodegradación de los compuestos orgánicos sintéticos persistentes en el ambiente.

En los trabajos científicos siempre es aconsejable formularse peros y llevar a término numerosas comprobaciones. En este caso, cabe preguntarse si el comportamiento del microorganismo será el mismo en el ecosistema o en la planta de tratamiento de aguas residuales o residuos sólidos que en el laboratorio. Para que las predicciones tengan sentido deberá proseguir el estudio de la fisiología y la ecología de estos microorganismos en dichos ambientes.

Recientemente, aprovechando el enorme poder antroposférico, se está estudiando también la posibilidad de diseñar mediante el uso de ordenadores una proteína que fije el DDT, luego sintetizar el gen que la codifique y finalmente clonarlo en bacterias para la obtención biotecnológica de proteína descontaminante de DDT. Aunque estos experimentos tienen aún que superar algunos problemas, estoy convencido de que no tardaremos en utilizar la biotecnología también en este campo.

6.4. LA RESISTENCIA A LOS PLAGUICIDAS. LA BIOSFERA NO SE RINDE FÁCILMENTE

Los agricultores saben bien que muchas plagas acaban desarrollando resistencias a los plaguicidas, lo que es preocupante porque hace inútiles unos insecticidas (en este capítulo me tomo la licencia de usar la palabra insecticida en el sentido más amplio, usado socialmente, equivalente a plaguicida) que en su mayoría, dada su generalmente prolongada persistencia, presentan serios riesgos medioambientales y de salud pública. A pesar de que esta resistencia es un fenómeno muy estudiado por su interés aplicado y científico (en genética, bioquímica, fisiología, etología, ecología, etc.), se sabe aún poco de los mecanismos que la generan y de cómo la heredan los insectos que constituyen las plagas agrícolas (BRATTSTEN *et al*, 1986). Aunque se dispone de mayor información en cuanto a los insectos vectores de enfermedades humanas, ésta no se puede aplicar directamente a los agrarios por las diferencias en su fisiología

y ecología —«se alimentan de la sangre» unos y de las plantas otros— que obligan a emplear distintas estrategias de control.

La resistencia a los insecticidas es un fenómeno multidimensional y dinámico que depende de factores bioquímicos, fisiológicos, genéticos y ecológicos. Se desarrolla por la supervivencia y reproducción de individuos con genomas alterados que les han posibilitado permanecer con vida después de la exposición al insecticida. La presión selectiva ejercida por éste sólo permite la reproducción de los resistentes, incrementándose así su población.

Los insectos han desarrollado resistencias a todas las grandes clases de insecticidas y lo seguirán haciendo a todas las futuras mientras se utilicen las actuales técnicas de aplicación. Desde la óptica ecológica y evolucionista, esto no sorprende en absoluto. Los insectos herbívoros han coexistido con las plantas superiores durante centenares de millones de años. Las plantas han respondido con la producción de sustancias defensivas que han favorecido la evolución, en contrapartida, de los insectos, obligados a desarrollar adaptaciones bioquímicas, fisiológicas y de comportamiento que les confieran resistencia (MOORE, 1986) (véase 4.3). En claro contraste con esta lenta adaptación a los tóxicos naturales, la resistencia a los insecticidas sintéticos ha aparecido con extrema rapidez a causa de las condiciones actuales de uso intensivo, en las que éstos pasan a ser el agente de selección más importante. La resistencia se puede generar de varias maneras. Se puede modificar la fisiología de los insectos, por ejemplo, de modo que se haga más lenta la penetración del plaguicida o se active su excreción; pero dada la complejidad de estos procesos, la adaptación puede ser muy lenta. Los mecanismos bioquímicos, por contra, sólo requieren cambios en una macromolécula de modo que destoxifique el insecticida, modifique su lugar de acción o disminuya la sensibilidad. También se puede modificar el comportamiento por aprendizaje, o por cambios en los receptores periféricos o en los sistemas centrales de procesamiento de las señales, aunque ésta es una adaptación menos frecuente que las anteriores. Cuando los mecanismos de adaptación son múltiples, se hace mucho más difícil controlar las plagas.

6.4.1. ¿Cómo tratar la resistencia?

Como ocurre en medicina, el diagnóstico precoz facilita enormemente el tratamiento. En este caso, anticiparse al fallo del insecticida no es nada fácil, dados los pocos conocimientos de que se dispone. El mayor problema consiste en la falta de una técnica que detecte los insectos resistentes cuando éstos se hallan aún en pequeña proporción ($< 1\%$).

La mejor estrategia de lucha contra la resistencia consiste en minimizar la presión de selección que ejerce el insecticida. Para lograrlo, la utilización juiciosa del plaguicida, complementada progresivamente con métodos de control alternativos, constituye el mejor tratamiento. La dosis y la forma de aplicación son de crucial importancia. Las poblaciones sensibles deberían ser controladas con las menores dosis posibles y sólo cuando existiera una plaga importante. La mejora en el uso debería pasar también por minimizar la exposición de las especies no objeto de tratamiento. La aplicación debería ir dirigida al estadio de vida más dañino o al más sensible (frecuentemente los huevos). Se podrían utilizar mezclas de insecticidas que retrasaran la aparición de resistencia por la dificultad de desarrollar adaptaciones simultáneas. Estas mezclas vendrían a sustituir el control químico ejercido por las plantas que contienen también mezclas de varias sustancias defensivas —especialmente, cuando las plantas cultivadas suelen haber mejorado en calidad a expensas de una disminución de sus defensas—. De todas formas, las mezclas deberían usarse con gran precaución. No sabemos cómo y en cuánto tiempo se adaptan las plagas. Podrían generarse especies con defensas efectivas contra la mayoría de los tratamientos químicos concebibles. También sería útil la aplicación de insecticidas sinérgicos (generalmente no tóxicos a las bajas concentraciones usadas), que incrementan hasta cientos de veces la toxicidad de los plaguicidas habituales. Los más utilizados son los que inhiben la acción enzimática defensiva del insecto ante el insecticida. Sin embargo, su alta especificidad y considerable precio disminuyen sus posibilidades de aplicación.

Los fallos en el control no siempre son debidos a la aparición de resistencia; pueden también deberse a una inadecuada

aplicación de las técnicas que haga posible la degradación del insecticida antes de que actúe, a un crecimiento secundario de la plaga, etc.

Con todo, es evidente la necesidad de que se estudie la biología de los organismos que pueden constituir las plagas. Mal podemos conocer el modo de acción de los plaguicidas, los mecanismos de resistencia y la forma de evitarla si no conocemos el metabolismo ni la ecología de esos organismos.

6.4.2. Alternativas a los plaguicidas

Los problemas asociados al uso de los plaguicidas químicos han hecho aumentar el interés por otros métodos alternativos de control de las plagas, que aunque requieren mayor investigación, constituyen una buena prueba de que no todo se acaba con los insecticidas químicos. Entre estos métodos vamos a citar los más prometedores. El uso de controles biológicos (depredadores, parásitos y agentes patógenos naturales) como destructores de los insectos comporta una enorme ventaja, su gran especificidad, y un peligro, su proliferación, que puede convertirse a su vez en un problema. El principal problema del desarrollo de variedades de plantas resistentes es el esfuerzo y el tiempo necesarios para conseguirlas y el hecho de que surjan nuevas variedades de insectos adaptadas a parasitarias. El empleo de atrayentes hormonales, luminosos y sonoros hacia trampas donde los insectos pueden ser eliminados parece muy interesante y se está trabajando mucho en este campo. Igual ocurre con el control genético ejercido soltando machos estériles de la misma especie para reducir la población. Ambos métodos presentan el inconveniente de que, al desaparecer toda competencia, se pueden convertir en plagas otras especies antes secundarias. El control ambiental tradicional por eliminación de las partes de las plantas que se dejan en el suelo después de las cosechas elimina el refugio en que los insectos sobreviven durante el invierno. Por la misma razón, era enormemente beneficiosa la rotación de cultivos. También se puede demorar la siembra hasta que se haya superado la fase de desarrollo de

la plaga más destructiva. La utilización de hormonas puede limitar el ciclo biológico de los insectos: por ejemplo, las hormonas juveniles impiden su madurez. De todos estos métodos quizás el más recomendable en los países de climas templados, con variaciones estacionales, sea la consecución de variedades de plantas resistentes en las zonas tropicales, la utilización de insectos machos estériles y de depredadores, parásitos y patógenos, por su más factible aplicación a grandes regiones.

A pesar de las grandes esperanzas suscitadas por estas alternativas, por el momento tenemos que utilizar —aunque eso sí, selectiva y prudentemente— los insecticidas, porque para el agricultor siguen constituyendo el mecanismo más eficaz, barato, de fácil aplicación y de acción rápida que hoy por hoy existe. Los otros métodos pasan por la concienciación pública y política de que la protección del medio ambiente-y-de la-salud pública es de interés para todo el país, y por lo tanto es éste en conjunto el que debe pagar, y no que sean sólo los agricultores quienes siempre «paguen el pato».

La resistencia a los insecticidas agrícolas proporciona muchas oportunidades de investigación básica y aplicada de carácter multidisciplinario. Todavía es necesaria mucha información. A esta falta de información ha contribuido el que la resistencia aún sea considerada un problema menor si se compara con los peligros ambientales y de salud pública de los plaguicidas. Sin embargo, una mejor comprensión de sus mecanismos es deseable para un tratamiento efectivo que reduzca los riesgos globales del uso exagerado de los insecticidas y active los sustanciales beneficios de la protección química de las cosechas.

6.5. EL OZONO, PROTECCIÓN Y AMENAZA PARA LOS SERES VIVOS

Decían, los sabios orientales: «En todo elemento de la naturaleza se conjugan dos principios, el sí y el no, el bien y el mal, el positivo y el negativo». A medida que la ciencia avanza, la vieja filosofía oriental (GREEL, 1976; LAL, 1965), lejos de

quedar obsoleta, se manifiesta aún vigente. A esta reflexión paracientífica, que no moral, me ha movido lo escrito en el capítulo del oxígeno, ese gas originariamente venenoso que ha hecho posible la eclosión de la vida tal como la conocemos en nuestro planeta.

Pero existe otro caso paradigmático, muy relacionado con el anterior y sin movernos de la misma atmósfera terrestre. Es el del ozono, un gas muy familiar para quienes trabajan con chispas eléctricas, hayan oído la parte posterior de su televisor en color, o utilizan radiación ultravioleta como esterilizante. Por una parte, su presencia en la estratosfera, entre aproximadamente 13 y 50 km de altura, es esencial para la vida porque impide la llegada masiva de radiación ultravioleta y estabiliza el clima; y por otra, en la troposfera o parte inferior de la atmósfera, entre 0 y 13 km de altura, actúa como un peligroso veneno para los vegetales y los animales, hombre incluido.

6.5.1. El ozono protector y sus enemigos

Este gas se encuentra esparcido por nuestra atmósfera con un nivel de máxima concentración a 25 km de altura (en la estratosfera). Se genera cuando la radiación ultravioleta rompe las moléculas de oxígeno en átomos que luego se reúnen de tres en tres. Como absorbe intensamente los rayos ultravioleta impide en gran medida que éstos lleguen a la superficie terrestre y dañen a los seres vivos. De todas formas, siempre pasa una pequeña parte de tal radiación, que es la causante del tan deseado bronceado que acredita socialmente unas buenas vacaciones, y cuyo exceso produce quemaduras y cáncer de piel.

Además de protector de los seres vivos, este gas es un importante estabilizador del clima, hecho no tan conocido. La troposfera es calentada por la irradiación de la superficie de la Tierra. Los movimientos convectivos del aire, que se eleva, se enfría y desciende, son los causantes de vientos y nubes; en resumen, del clima. En cambio, la estratosfera se calienta, principalmente su parte superior, por la absorción de radiación ultravioleta por el ozono. Si disminuye la cantidad de ozono, las

capas superiores de la atmósfera se enfriarán y por contra llegará más sol a la superficie terrestre, con el consiguiente calentamiento y desestabilización del clima.

Por todo ello, la posible destrucción de la capa de ozono es causa de profunda preocupación. Esta fue especialmente viva a mediados de la década pasada, cuando se comprobó que los derivados halogenados de aerosoles y refrigerantes reducían el ozono (O_3) a oxígeno (O_2) sin apenas consumirse en el proceso, por lo que muy poca cantidad bastaba para ir destruyendo la capa estratosférica. De ahí que los organismos de protección ambiental europeos obligasen a disminuir su uso en aerosoles y los americanos los prohibiesen. De todas formas, al ser utilizados en otro tipo de industrias, como las de refrigeración, menos susceptibles de ser reguladas, ha hecho que su concentración siguiese creciendo (figura 42).

La capa de ozono tiene también otros enemigos, que hasta hace poco pasaron bastante inadvertidos. Por ejemplo, algunos autores establecen la posibilidad de que las erupciones volcánicas combinadas con las anomalías climáticas, como la famosa del Niño que tuvo lugar en el Pacífico en 1983, produjesen la menor concentración de ozono en sesenta años, posiblemente como consecuencia de la enorme liberación de cloruros.

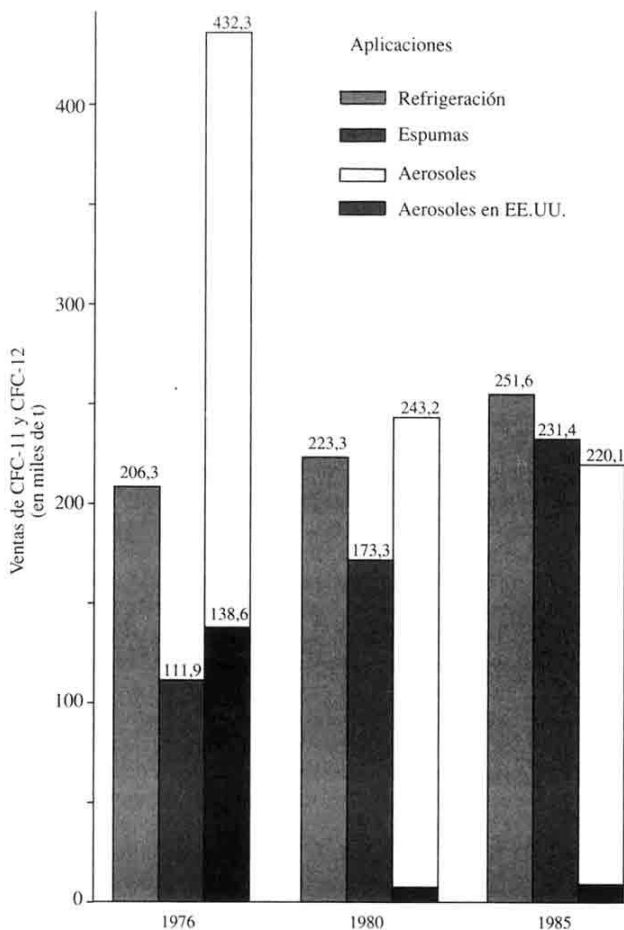


Fig. 42. Demanda creciente de derivados halogenados. La disminución en el uso de aerosoles, especialmente en los EE.UU., se ha visto ampliamente superada por el aumento de su uso para otras aplicaciones. Los datos de 1985 no incluyen el uso en la URSS, la Europa del Este ni la China. (De NORMAN. 1987.)

Pero no todos son enemigos en el complejísimo proceso de formación y destrucción del ozono. Así, otros agentes atmosféricos, el dióxido de carbono, el metano y los óxidos de nitrógeno, desempeñan un trascendental papel en su formación. Por cierto, el metano, originado por procesos biológicos en ambientes anaerobios como el vientre de los animales, los pantanos cenagosos o los campos de arroz, es tan efectivo como el dióxido de carbono para causar el ya famoso efecto invernadero y está aumentando tres veces más rápidamente. Ha habido una importante —y hasta podríamos decir que cómica— controversia sobre la flatulencia de la creciente cabaña animal como principal causa de este incremento).

6.5.2. El agujero de ozono de la Antártida

Se ha hablado mucho del agujero en la capa de ozono de la Antártida detectado a finales del invierno austral. Parece, según trabajos recientes, que también en el polo Norte se adelgaza la capa de ozono. Su significado y causa permanecen todavía como un misterio y sus implicaciones no quedarán claras hasta que se conozca el mecanismo por el que se produce. Se han propuesto varios (MARGITAN, 1987): uno puramente dinámico, constituido por movimientos ascendentes de aire en el polo; otro debido a un efecto catalítico de los óxidos de nitrógeno descendentes tras ser producidos a altas altitudes por la actividad solar, y finalmente otro producido por la reacción de los derivados clorados con las nubes polares estratosféricas, es decir, efecto de la actividad humana. Los últimos trabajos de la NOZE (Expedición Norteamericana del Ozono) (MARCHAN, 1987) parecen contradecir las dos primeras, de modo que por exclusión favorecen la última. Ello vendría a confirmar otros trabajos (CRUTZEN y ARNOLD, 1986) que postulan que el mecanismo actuaría mediante la formación de una nube de ácido nítrico en la estratosfera antártica.

6.5.3. No hay que caer en el pánico, lo más probable es que Gaia actúe

La supervivencia de nuestra especie y la rica variedad de la vida en Gaia parece una prueba concluyente de que o bien el deterioro de la capa de ozono no es tan letal, o bien las citadas teóricas agresiones nunca tuvieron efecto. Y además, durante los dos primeros miles de millones de años desde la aparición de la vida, bacterias y cianobacterias estuvieron expuestos, sin protección alguna, a la radiación ultravioleta solar. Aunque hay que poner, prudencia en el uso de aerosoles y refrigerantes con haloderivados, tampoco debe caerse en el pánico. Es más, probablemente el grueso del cloro atmosférico se encuentra hoy en forma de cloruro de metilo gaseoso, un producto directo de la agricultura tropical y de las algas de las plataformas continentales. Por cierto, se había hablado de cultivar dichas algas; si tal cosa se llevara a la práctica a gran escala, se originarían problemas casi idénticos a los de la liberación de derivados halogenados.

6.5.4. El ozono, tóxico para los animales...

Hace tiempo que se sabe que el ozono es tóxico para los seres humanos y los seres vivos en general a concentraciones tan bajas como 1 ppm (parte por millón). Este hecho no constituiría ningún problema si el ozono se formase en la estratosfera; pero el caso es que también se produce en la troposfera, la atmósfera baja, cuando las emisiones de combustible no quemados, de gases de pinturas, etc., reaccionan bajo la luz solar con productos de combustión, como los óxidos de nitrógeno. Todos estos componentes abundan en las zonas industriales y urbanas; de hecho, el ozono es el principal componente de lo que comúnmente se conoce como *smog*.

A finales de 1986 el ozono saltó de nuevo al primer plano informativo, especialmente en Estados Unidos, tras los nuevos estudios sobre polución atmosférica en que se concluía que este gas causa agudos efectos perniciosos para la salud a concentraciones mucho menores que las previamente consideradas como potencialmente peligrosas, y que los máximos tolerados por los organismos de protección ambiental y de la salud pública (0,12 ppm en EE.UU.) pueden no ser adecuados. En efecto, a esas

concentraciones se han apreciado reducciones en la capacidad pulmonar, agravamiento de enfermedades respiratorias como el asma y aumento de las hospitalizaciones —cuadro general al que no es nada ajena la población de nuestras grandes ciudades en ciertos días puntas del año—. Además, experimentos de toxicología animal, aprecian envejecimiento prematuro de los pulmones con daño estructural y disminución de la capacidad inmunológica ante infecciones respiratorias.

Estos nuevos datos preocupan especialmente en zonas industriales o con mucho tráfico automovilístico, como la de Los Ángeles, donde se llegan a medir concentraciones hasta tres veces superiores a las ya dañinas 0,12 ppm toleradas por la agencia de protección ambiental norteamericana.

6.5.5 ...y las plantas

La polución atmosférica, además de los agentes naturales, como los insectos, la sequía, las enfermedades o los tristemente famosos, y en muchos casos quizá no tan naturales, incendios forestales, ha sido considerada como una de las causas básicas de la desaparición de los árboles. La lluvia ácida es la forma de polución que recibe mayor atención, especialmente en Europa, aunque su efecto en los sistemas terrestres no está tan claro como en los ecosistemas acuáticos. En cambio, se considera que el ozono es el gas que mayor daño produce en la vegetación (REICH y SMUNDSON, 1985), daño que no se manifiesta de forma visible en las hojas ni se sabe cómo se produce o por qué se da diferente sensibilidad según la especie, pero que se traduce en una marcada disminución en la fotosíntesis neta del vegetal. El efecto inmediato es superior sobre las cosechas que sobre los árboles, que crecen más lentamente pero como éstos viven más, la acción del ozono se magnifica con el paso de los años, haciéndolos más susceptibles a las plagas, las enfermedades y el estrés abiótico, como el provocado por el frío o la sequía.

En ciencia, por suerte, nada es definitivo; aun así, harán bien los encargados de los organismos de protección ambiental y de la salud pública en tener en cuenta los sucesivos estudios

que vayan apareciendo sobre éste y otros temas referentes al medio ambiente antroposférico.

6.6. MODIFICACIONES DEL CLIMA PROVOCADAS POR LA ACTIVIDAD ANTROPOSFÉRICA

En condiciones naturales, nuestro planeta tiende a enfriarse lenta pero paulatinamente; desde hace unos cinco mil años se dirige hacia una nueva era glacial (fig. 43). Sin embargo, precisamente desde entonces ha ido adquiriendo importancia creciente un nuevo factor: el hombre «civilizado» y la antroposfera. La civilización en sus diversas facetas, es capaz de generar cambios climáticos, de momento principalmente de tipo local, pero que con el tiempo puede adquirir un carácter más general, especialmente desde el advenimiento de la era tecnológica, en la que el hombre ha dado [su gran salto cualitativo: de usar lo que la naturaleza le ofrecía está pasando a modificarla, cada vez a mayor escalara el fin de adaptarla a sus necesidades y comodidad. Con ello se constata una vez más la creciente importancia de la antroposfera, que se está situando al mismo nivel que las demás capas: atmósfera, litosfera, hidrosfera o su misma madre, la biosfera. Consideraremos seguidamente algunas actividades antroposféricas que pueden modificar el clima del planeta.

6.6.1. Campo y ciudad: desertización e islas de calor urbanas

El surgimiento de la civilización trae consigo la modificación de la tierra para producir alimentos y para crear ambientes confortables; en eso consiste, precisamente, la civilización. De inmediato nos viene al pensamiento los conceptos de agricultura, ganadería, deforestación, desertización, embalses, urbanizaciones, etc., elementos todos ellos que conducen a cambios profundos (mayores o menores según la intensidad y rapidez con que se produce) en el albedo —reflexión de la energía solar— y en el balance hídrico, los dos factores determinantes del clima.

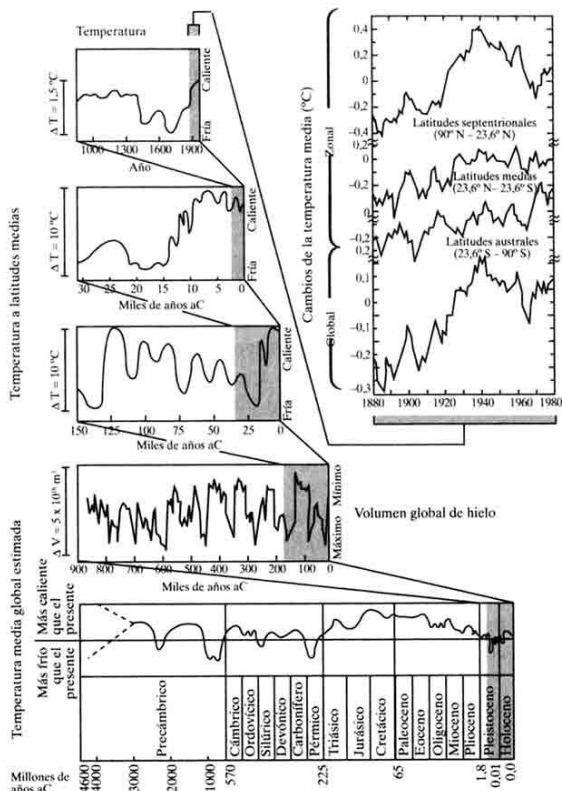


Fig. 43. Esquema de los cambios climáticos habidos en la Tierra desde su formación hasta nuestros días. Desde la desaparición de los dinosaurios, la Tierra ha estado inmersa en una época glacial. El período relativamente cálido durante el cual ha florecido la antroposfera representa un período interglacial de corta duración. Utilizando isótopos de oxígeno en muestras de hielo se ha obtenido una guía precisa de las variaciones de temperatura en el Atlántico norte en los tiempos históricos recientes (era cristiana). Es curioso constatar la estrecha relación que guardan con los acontecimientos históricos. Finalmente, en los últimos cien años hemos asistido a un relativo calentamiento del hemisferio norte. (Basada en datos de FRANKS, 1979. National Academy of Sciences de EE.UU., DANSGAARD en GRIBBIN, 1986, HANSEN *et al.*, 1981 y SCHNEIDER y LONDER. 1984.)

Empecemos por el campo. Con la deforestación y posterior dedicación a tierra de cultivo, se transforma un área oscura en otra mucho más reflectante, y, por lo tanto, disminuye la radiación solar absorbida —la que mueve la máquina climática—. Especialmente importantes son los bosques tropicales, que según la mayoría de los autores tienen mucha trascendencia en los balances globales energéticos e hídricos del planeta, y por lo tanto en las posibles alteraciones del clima. Incluso parece que el 50% de las lluvias tropicales son aguas evapotranspiradas, es decir, recicladas a través de los propios bosques. La deforestación de estas masas boscosas y de otras zonas altera además la composición atmosférica, porque la materia orgánica quemada o descompuesta libera CO_2 y otros contaminantes gaseosos y sólidos.

También algunas prácticas ganaderas irracionales han incidido en estos procesos, al contribuir al aumento de las áreas desérticas, y en consecuencia del albedo, a lo largo de los años de civilización.

En otro orden, pero aún en el ámbito de la agricultura, es interesante recordar, aunque su importancia sea mucho menor, los cambios climáticos producidos voluntariamente, en contraposición a los aquí tratados, producidos de forma involuntaria como consecuencia de las actividades humanas. Los ingenieros agrícolas, asociados con los climatólogos y otros técnicos, estudian la posibilidad de alterar artificialmente los climas locales produciendo lluvia, eliminando el granizo, embalsando agua, etc. para aumentar la producción y asegurar las cosechas, aunque sólo lo (logran a escala muy local. Otros proyectos de mayor envergadura (inundar grandes extensiones de terreno en Siberia, eliminar los hielos del Ártico, desviar las corrientes oceánicas del Pacífico, aumentar la pluviosidad del Sahel, transportar icebergs a zonas áridas, etc.) son más fantásticos, especulativos y problemáticos.

Trasladémonos a la ciudad. En ella, el hombre urbano, al igual que hace el rural o hizo el primitivo habitante de las cavernas, calienta su hogar, pero ahora mucho más potentemente con el uso de combustibles fósiles y otras fuentes de energía

exosomática. Hay en la actualidad, además, muchos más millones de seres humanos en sus hogares, en las oficinas, en las fábricas, etc., y generalmente concentrados en pequeñas áreas saturadas de ladrillo y asfalto, conservadores del calor. El resultado de todo ello son las «islas de calor urbanas» (fig. 44). Las grandes ciudades son unos grados centígrados más calientes que las zonas rurales que las circundan (se trata de la polución térmica) y su precipitación también puede ser diferente en cantidad y en calidad (contaminación química) (tabla 10). En ellas se da sólo una reducida evaporación, pero al mismo tiempo, el calor hace subir el aire, que al enfriarse facilita la condensación y la precipitación.

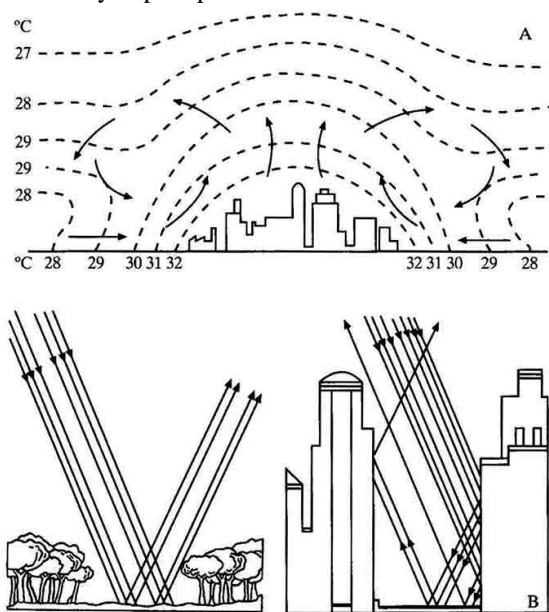


Fig. 44. Isla de calor urbana. A: Líneas isotermas que muestran la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de la ciudad. Sobre la ciudad se generan movimientos ascendentes del aire. La depresión térmica correspondiente puede dar lugar a vientos dirigidos hacia el núcleo urbano. B: Influencia de los edificios sobre el albedo. En las ciudades se da menor poder reflector como consecuencia de la reflexión de la radiación

solar hacia el suelo, provocada por las paredes verticales. (Modificado de BESSEMOLLIN *et al.*, 1983.)

<i>Elemento</i>	<i>Comparado con el ambiente rural</i>
Temperatura	
Media anual	De 0.5 a 0.8 °C más alta
Mínima invernal	De 1,1 a 1,7 °C más alta
Humedad relativa	
Media anual	6% más baja
Invierno	2% más baja
Verano	8% más baja
Partículas de polvo	10 veces más
Nubosidad	
Nubes	Del 5% al 10% más
Niebla invernal	100% más
Niebla estival	30% más
Radiación	
Total sobre la superficie horizontal	Del 15% al 20% menos
Ultravioleta, invierno	30% menos
Ultravioleta, verano	5% menos
Velocidad del viento	
Media anual	Del 20% al 30% menos
Ráfagas extremas	Del 10% al 20% menos
Calmas	Del 5% al 20% más
Precipitación	
Global	Del 5% al 10% más
Días de lluvia	10% más

Tabla 10. Cambios climáticos producidos en las ciudades. (De LANSBERG, 1962.)

El calor liberado por Manhattan, por ejemplo, es superior al de la radiación solar que recibe. Sin embargo, a escala planetaria el calor liberado por las ciudades es aún muy poco en proporción con el que origina la radiación solar (1/10.000), y no produce cambios climáticos globales. Sí que pueden producirse efectos regionales en áreas como Bosnywash (Boston, Nueva York, Washington), que aparece como una enorme mancha de luz en la noche espacial.

En estas islas urbanas, además, disminuye la visibilidad y aumentan los aerosoles atmosféricos y los gases tóxicos (CO, SO₂, N₂O, O₃), con sus particulares efectos sobre el clima.

6.6.2. Aerosoles atmosféricos y lluvia ácida. Las termitas se fueron de El Escorial

Los aerosoles atmosféricos están constituidos por las partículas suspendidas en el aire. Pueden ser de origen natural —polvo levantado por el viento, gotas de agua marina alzadas por las tormentas, polen, etc.—, o de origen humano —polvo y humo producidos por la industria, por la agricultura, etc.

Cuando entre 1940 y 1970 tuvo lugar un ligero descenso de la temperatura, liberando a los preocupados gobernantes españoles de aquella época de una creciente plaga de termitas que amenazaba El Escorial, se atribuyó la causa al aumento de aerosoles. Sin embargo, ahora se discute esta atribución, pues parece dudoso que se diera un aumento de aerosoles a partir de los años sesenta, cuando su uso fue regulado y disminuido (fig. 42). Puede que este pequeño cambio no fuera más que una oscilación típica del clima a largo plazo, o puede que fuese debido a otros factores, naturales o no, como una disminución de la constante solar o un aumento del polvo volcánico o del producido por las pruebas nucleares de los años sesenta (HOLDSWORTH. 1986). Además, los aerosoles no necesariamente producen un enfriamiento: según su color, pueden absorber mayor radiación y aumentar el efecto invernadero, o bien hacer cualquiera de las dos cosas. El efecto también depende del hábitat o ecosistema: los aerosoles enfrían en una zona boscosa y calientan en desiertos o campos nevados. También pueden cebar las nubes, induciendo la precipitación al facilitar la condensación, y pueden modificar algunas de sus características, como la brillantez, lo que puede tener consecuencias climáticas, aunque predecir en qué sentido no es aún posible a la luz de los conocimientos actuales (COVEY, 1987). Por ello, la actitud actual de la ciencia ante el dilema calentamiento o enfriamiento por aerosoles es bastante «agnóstica». Se debe estudiar más y en diferentes condiciones. Parece que la presencia de aerosoles no es un factor tan importante en los cambios climáticos como lo pueden ser el CO_2 o el polvo volcánico. Sacando partido de este menguado conocimiento, Reagan afirmó durante la campaña presidencial norteamericana de 1980, para quitar hierro al tema de la polución industrial y sin

duda orientado por sus más audaces consejeros, que los árboles eran importantes contaminantes. Aunque es cierto que emiten azufre, nitrógeno y compuestos hidrocarbonados (algunos de los cuales producen aerosoles muy similares a los contaminantes humanos, en un proceso especialmente activado por los incendios forestales), esta polución natural es muy parecida año tras año, y el clima ya se ha adaptado a la misma. No se halla adaptado, en cambio, a los rápidos cambios introducidos por los aerosoles antropogénicos, que en las zonas industriales exceden vastamente a los naturales.

La producción industrial y automovilística de óxidos de azufre y de nitrógeno genera muchos de estos aerosoles de origen humano (CALVERT *et al.*, 1985). Estas partículas son, a menudo, gotas de ácido nítrico y ácido sulfúrico, las cuales, junto con el ozono, dotan al *smog* de sus efectos irritantes sobre ojos y pulmones y necrosadores sobre las plantas. Cuando se precipitan hacia el suelo dan lugar al tristemente famoso fenómeno de la lluvia ácida, que parece ser la causa de la pérdida de nutrientes en los suelos de Norteamérica, del envenenamiento ácido de los lagos escandinavos, de la concentración de metales pesados en el agua subterránea de Suecia, de la muerte de los tejidos vegetales de los árboles (son famosos los casos de los bosques centroeuropeos, o los de alrededor de las centrales de Andorra en la provincia de Teruel y de Ceres en la de Barcelona), del impedimento de fijación del nitrógeno, de la aceleración de la corrosión, etc.

Estos aerosoles son transportados a grandes distancias, especialmente cuando proceden de chimeneas muy altas (la de Andorra es visible a más de 30 km de distancia). Ello ha provocado más de un conflicto internacional. Los más conocidos son los que enfrentan a los Estados Unidos con Canadá y al Reino Unido con los países escandinavos. Esto se podría solucionar en parte con el uso de combustibles con menor contenido de azufre, pero son más caros. También son costosos los sistemas de eliminación de SO_2 . Se debe estudiar, de todos modos, la química de conversión de los óxidos de azufre y nitrógeno en la lluvia ácida para tratar con mayor propiedad estos problemas.

6.6.3. El CO₂ y el efecto invernadero. ¿Volverán las termitas a El Escorial?

Ante las necesidades energéticas de una población creciente, la humanidad debe elegir entre los combustibles fósiles y la energía nuclear u otras alternativas hasta el momento no suficientemente desarrolladas. La energía nuclear conlleva el riesgo de catástrofes repentinas o paulatinas y es socialmente considerada peligrosa. Por el contrario, en general pasan inadvertidos los importantes riesgos que conlleva el uso continuado y creciente de combustibles fósiles. Dejando aparte los económicos y los de agotamiento de recursos no renovables, que veremos después, presenta la amenaza de cambios lentos del clima y del ambiente.

6.6.3.1. El CO₂ aumenta

El CO₂, producto de la combustión, es emitido a la atmósfera. La mitad del mismo permanece en ella, mientras que la otra mitad es absorbida por los océanos, mediante equilibrios quimicobiológicos, y por las plantas, que lo utilizan como sustrato básico de la fotosíntesis.

La concentración de CO₂ en la atmósfera, que durante los últimos diez mil años se había mantenido alrededor de 280 ppm, subió a 290 ppm en los períodos iniciales de la industrialización (1905) y es ahora de 343 ppm (fig. 45). Parece, sin embargo, que las elevadas tasas de incremento medidas en las últimas décadas han descendido a algo más de la mitad (1,4 ppm por año). Las razones de este cambio, no del todo bien conocidas, dependen presumiblemente de las interacciones con el agua y la biosfera.

Trabajando con isótopos del carbono, el radiactivo ¹⁴C y el estable ¹³C, se ha llegado a la conclusión, aún algo controvertida y presentada aquí esquemáticamente, de que la mitad del aumento del CO₂ atmosférico actual se debe a la quema de combustibles fósiles (el CO₂ de este origen se reconoce porque no contiene ¹⁴C, cuya vida media es de 5.730 años y por lo tanto está extinguido en el material fósil) y la otra mitad a la deforestación, desecación de zonas húmedas y otras prácticas agrí-

colas, que liberan CO_2 con menor proporción de ^{13}C (previamente discriminado por las plantas al llevar a cabo la fotosíntesis, proceso en el que se utiliza preferentemente ^{12}C) (fig. 46). El CO_2 producido por estas actividades es el doble del que queda retenido en la atmósfera. El sumidero de esta mitad de CO_2 parece ser el océano, el cual, debido a la relativamente lenta mezcla de sus masas de agua, no puede absorber todo el aumento de CO_2 a corto plazo, aunque sí parece capaz de drenarlo a largo plazo.

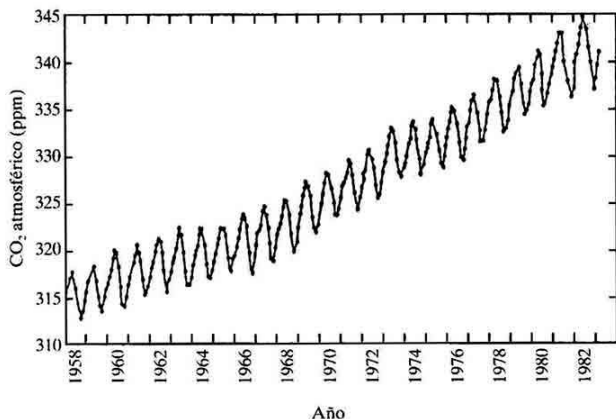


Fig. 45. Aumento de la concentración de CO_2 atmosférico registrado en el observatorio de Mauna Loa, Hawái. Las fluctuaciones estacionales regulares corresponden a las estaciones (respiración en el invierno boreal y fotosíntesis en el verano boreal). El hemisferio norte es el determinante por su mayor superficie continental, con mayor producción vegetal que los océanos. (Datos de los Laboratorios de Recursos del Aire de la National Oceanic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos.)

La clave no es la cantidad de CO_2 sino la velocidad con que se produce. En cambio, no parece tan importante el papel desempeñado por la fotosíntesis de las plantas como absorbentes de ese exceso de CO_2 , quizá porque el carbono no es el único elemento limitante de la producción vegetal. Parece que el aporte —consecuencia de la deforestación y otras actividades rurales y agrícolas— es superior al drenaje.

No es de esperar que en los próximos años vaya a detenerse el aumento del CO_2 , especialmente el originado por la combustión de materiales fósiles. En este sentido, cabe recordar que la crisis de la energía está relacionada con los crecientes costos de la misma, no con la escasez de combustibles, y que después de los crudos, se puede usar el carbón. Un factor a tener en cuenta en los próximos años va a ser el importante incremento en la producción de CO_2 por parte de los países del Tercer Mundo. Se han llevado a cabo y se están realizando previsiones de la posible evolución de la producción de CO_2 en las distintas regiones del globo que así parecen señalarlo.

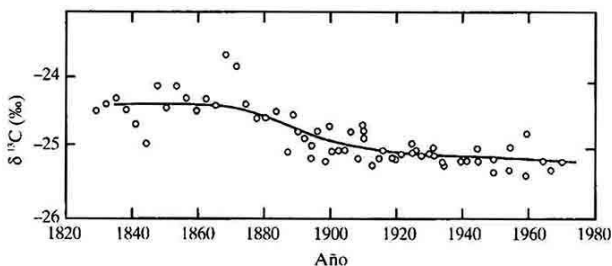


Fig. 46. Reducción del ^{13}C en la atmósfera. Muestra que la biota actúa como fuente de CO_2 atmosférico, no como sumidero, pues cada vez hay más ^{12}C (el de origen vegetal reciente) en el aire. Los análisis de atmósferas pasadas se llevan a cabo estudiando los anillos anuales de los árboles. (De STIMVER. 1978.)

¿Puede este aumento del CO_2 cambiar el clima y el ambiente? Esta cuestión ya se planteó a finales del siglo pasado, cristalizó hace unos veinticinco años y se ha popularizado y politizado en la última década, hasta convertirse en foco de atención periodística.

6.6.3.2. Efecto invernadero

¿Cómo puede preocupar así un gas incoloro e inodoro y aparentemente inocuo? La razón estriba en una importante propiedad: el CO_2 y el vapor de agua son los gases que más intensamente absorben la radiación infrarroja (fig. 47), que es en gran parte la forma en que la Tierra devuelve la radiación solar

incidente al frío espacio exterior. Esta devolución irá siendo en consecuencia progresivamente impedida a medida que aumenta la concentración de CO_2 , que a diferencia del vapor de agua se halla uniformemente distribuido por la atmósfera hasta una altura de 100 km, convirtiendo a la Tierra en un enorme invernadero que mantiene el calor y eleva la temperatura.

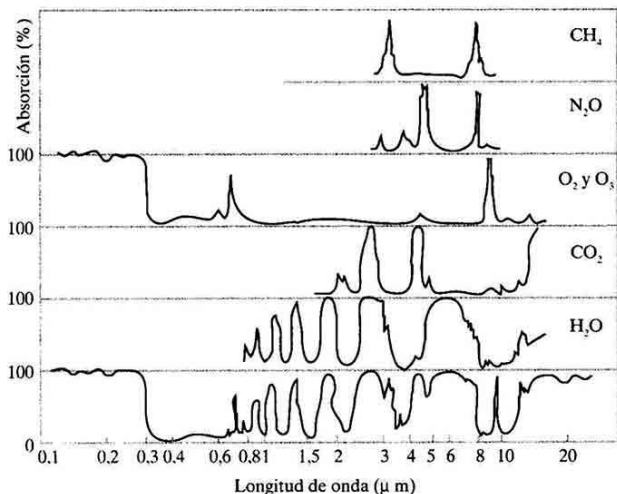


Fig. 47. Espectros de absorción de la radiación solar por diferentes gases atmosféricos y por el aire en conjunto a nivel del suelo. (Según FLEAGLE y BUSINGER. 1963.)

Muchos climatólogos creen, pues, que el claro aumento del CO_2 atmosférico producirá un calentamiento general de la baja atmósfera como consecuencia del efecto invernadero.

6.6.3.3. Aumento de temperatura

Quizás una de nuestras grandes contaminaciones sea el calor. Algunos investigadores hablan de que puede ser contrarrestado por el enfriamiento natural que se produce a medida que el planeta oscila hacia una nueva era glacial. Sin embargo, las escalas de tiempo no son comparables. El alineamiento astronómico que provocará el enfriamiento del planeta está lejos, a miles de años, no en los próximos siglos.

Durante estos últimos años están apareciendo, de manera continua en las revistas científicas, modelos climáticos estimatorios de los cambios de temperatura y precipitación que puede generar el aumento de CO_2 . Existe una importante controversia sobre la magnitud de estos cambios, pero en general se acepta que al doblarse la concentración, supuesto que se había calculado que podría ocurrir en el año 2030 y que ahora, con las nuevas tasas, se espera para el 2080, se incrementará la temperatura en dos o tres grados, aunque no de manera uniforme: de cinco a seis grados en los polos, y uno en las regiones ecuatoriales. En el caso de que se quemasen todos los combustibles fósiles que restan en la Tierra, el aumento global de temperatura no pasaría seguramente de los seis grados.

Además, y como consecuencia del cambio térmico, se vaticina un cambio en el régimen de precipitaciones. En principio, un mundo más cálido irá acompañado de un incremento de la pluviosidad, resultado del aumento de la evaporación. Pero según estos modelos, la distribución no será uniforme: ciertas áreas del mundo —gran parte de los Estados Unidos, Europa oriental y la URSS— experimentarán descensos en las precipitaciones. Aunque los climas de Alaska, Canadá, Europa occidental, norte y este de África, entre otras regiones, devengan más húmedos, la sequía prevista en el actual cinturón de granjeros del mundo no deja de ser motivo de preocupación.

Esta hipótesis, la más ampliamente aceptada, tiene algunos detractores. Entre los más famosos se halla Idso, quien afirma que la temperatura sólo aumentará unas pocas décimas de grado ($0,2^\circ\text{C}$). Este autor asegura que, en cualquier caso, la atmósfera nunca podría ser más eficaz que un cuerpo negro en lo que hace a la absorción de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre. Actualmente esa eficacia ya es de un 90%; con ello, el efecto invernadero global parece originar una temperatura superior en 40°C a la de una Tierra sin atmósfera. El 10% que resta, dice Idso, no podría producir un aumento de la temperatura mayor de cuatro grados. Todo esto considerando solamente cambios normales. Las pruebas geológicas concuerdan: durante los últimos millones de años, la Tierra no ha tenido una temperatura superior en dos grados a la actual,

aunque las cantidades de CO₂ y otros gases han variado considerablemente. Sin embargo, sus argumentos han sido duramente criticados por muchos autores, como Schneider, que en su último libro (1984) le acusa de olvidar las más elementales leyes de la termodinámica e incluso de la ética científica.

La verdad puede hallarse entre ambas opciones, y si es así, aún existen serios motivos de preocupación. Algunas regiones del globo se verían mucho más afectadas que otras. Los países ricos del Norte sufrirían mucho más las consecuencias de los cambios climáticos asociados a un mundo más caliente; los países pobres del Sur lo harían en función de su enorme dependencia alimentaria y tecnológica de aquéllos.

Otros autores subrayan que es el vapor de agua y no el CO₂ el principal absorbente de los rayos infrarrojos. Además, un aumento de la temperatura iría seguido de otro de la evaporación, lo que implicaría un aumento de la nubosidad, y éste un aumento de la reflexión, con la consiguiente disminución del efecto invernadero. Se trata del efecto *feedback* de las nubes. Cabe considerar también la teoría de la existencia de un efecto contrario al de invernadero. El aumento de CO₂ produciría un aumento del fitoplancton oceánico que incrementaría a su vez el albedo y enfriaría el clima. Esta hipótesis resulta realmente especulativa, pues el CO₂ no es el principal nutriente limitante del plancton.

6.6.3.4. *Prudencia*

La intrincada maraña de factores que pueden enmascarar el efecto del CO₂ —variaciones solares, relaciones orbitales, aerosoles volcánicos, cambios en otros gases como el metano o el ozono, etc., y hasta hipotéticos inviernos producidos por conflagraciones nucleares, y el no del todo bien conocido papel que los organismos vivos pueden desempeñar— impone prudencia a la hora de valorar estos modelos. Su fiabilidad, por otra parte, parece ganar puntos al ajustarse bastante bien a los cambios climáticos habidos desde principios del presente siglo.

Se ha hablado también mucho del riesgo de un ascenso del nivel del mar a consecuencia de la fusión de los hielos polares. Sin embargo, este dramático efecto parece bastante remoto. Se

ha propuesto que al aumentar cinco grados la temperatura del agua del mar, ésta se dilataría, elevándose su nivel un metro; pero no es seguro, pues ese efecto parece bastante insignificante. Por otra parte, pasarían muchos años antes de que el agua oceánica se calentase, aunque lo hiciese rápidamente la troposfera. Además, cuando se funden los hielos polares flotantes no se produce aumento alguno en el nivel del agua porque el hielo flotante desplaza tanta agua como la liberada al fundirse. El peligro más importante puede provenir, no del Ártico, sino de los hielos continentales de la Antártida o de Groenlandia; pero el hielo se funde con lentitud y tardaría siglos. En cambio, sí que se podría producir una brusca ola de marea si se rompiera la totalidad de la barrera de hielo de la Antártida occidental. Con todo, los efectos negativos, según cálculos económicos globales, no serían superiores a los de la crisis de energía de 1974; no así los particulares, que serían especialmente negativos en las zonas costeras de los países pobres, con menor capacidad de reacción.

La concentración de CO_2 hace años que aumenta en nuestra atmósfera. Por lo menos, tenemos datos fidedignos desde 1958. ¿Podemos apreciar ya los cambios de temperatura previstos? La respuesta es aún no, por lo menos no claramente, pues a pesar de que se ha apreciado un aumento global de las décimas de grado (fig. 43), no se han podido aportar pruebas estadísticas significativas. La inherente variabilidad del clima hace difícil la detección de cambios sin confundirlos con «ruido». También puede que los modelos exageren o que existan fenómenos compensatorios, como el polvo antropogénico —el «volcán humano».

A este respecto no dejan de sorprender las sucesivas oleadas de frío y nieve de los últimos inviernos. ¿Contradicen el esperado calentamiento por el efecto invernadero del CO_2 ? Parece que no, pues los modelos climáticos que lo tienen en cuenta prevén acusados aumentos de la temperatura, pero sólo en primavera, verano y otoño; no en invierno, que se prevé más frío, con frecuentes situaciones como la vivida en enero de 1987 —anticiclones en el norte de Europa que nos envían fríos

vientos del norte y del noreste en lugar de los habituales y más suaves del oeste, del Atlántico.

La respuesta a estos enigmas la tendremos seguramente a finales de siglo, pues es previsible que entonces se puedan comprobar los efectos predichos sin la ambigüedad introducida por otros cambios climáticos de fondo.

No todo es negativo en el efecto invernadero del CO_2 . Las más confortables condiciones de nuestro siglo y la explosión agrícola pueden deberse, al menos en parte, a este efecto. Desde el punto de vista optimista, puede que aún aumente más la producción agrícola. Además, cabe recordar que las propiedades y gran abundancia del CO_2 hicieron que la Tierra fuese en sus inicios un planeta suficientemente cálido (KASTING y ACKERMAN, 1987) como para que hubiera agua líquida, y con ella se originase la vida hace unos cuatro mil millones de años. Además, el efecto invernadero del CO_2 , con su acción generadora de un incremento del ozono de la estratosfera, puede ayudar a compensar la acción destructora ejercida por los derivados halogenados.

Es necesario seguir estudiando esta cuestión para llegar a conclusiones fiables. Si entonces se considerara necesario, se podría limitar el uso de combustibles fósiles, pues cuanto más pronto se tomen medidas, más fácil será conseguir los resultados esperados, máxime en este tema, en el que planificar, diseñar, construir y poner en marcha centrales solares, térmicas, oceánicas, nucleares y de otras energías alternativas requiere varios lustros. Es preciso también estudiar el aumento de productividad de las plantas a largo plazo, hasta ahora comprobado sólo en cortos períodos de tiempo (PEÑÜELAS y FIELD, 1988), que podría convertirse en la contrapartida positiva del reto que el aumento de CO_2 representa. Puede que en las próximas décadas pasemos de la especulación a la aplicación.

6.6.4. Otras actividades que pueden alterar el clima

6.6.4.1. Efecto invernadero de los gases traza

Los posibles efectos de los llamados gases traza —CH₄, N₂O, O₃, etc.— han sido considerados poco importantes, porque se hallan en la atmósfera en menor concentración que el vapor de agua y el CO₂. Y sin embargo, el N₂O, subproducto de la quema de combustibles fósiles y de la desnitrificación de fertilizantes, el CH₄, subproducto de la cabaña animal y la deforestación, y el mismo ozono, pueden causar cambios de la temperatura, pues también absorben la radiación infrarroja (fig. 47); todos juntos pueden llegar a igualar el efecto del CO₂. También cabe considerar a los productos clorofluorocarbonados de los sprays propelentes y refrigerantes, que causan otros efectos además del destructor del ozono estratosférico, entre ellos el de provocar un acusado efecto invernadero incluso en pequeñas cantidades.

6.6.4.2. *El invierno nuclear*

Todas las predicciones sobre el clima futuro deben tener presente la posibilidad de cambios climáticos inesperados producidos por la naturaleza (por ejemplo, emisiones volcánicas extraordinarias) o. a partir de ahora, por la antroposfera. Tal es el caso de una hipotética guerra nuclear a gran escala, con el probablemente consiguiente invierno nuclear.

Aunque pueda parecer absurdo preocuparse por los cambios climáticos posteriores a una guerra nuclear a gran escala, puede que no lo sea tanto para los posibles supervivientes. Además, estos cambios podrían producir mayor cantidad de muertes que la misma explosión y sus efectos radiactivos.

Una guerra nuclear que liberara de cinco mil a diez mil megatones parece que eliminaría el 50% o más de la capa de ozono y produciría una cantidad de polvo equivalente a la del volcán Krakatoa (de diez millones de toneladas). Además, se generarían grandes incendios forestales y químicos que podrían durar semanas o quizá meses. El humo y sus partículas absorberían la radiación solar, calentando sólo las capas superiores de la atmósfera, alejadas de la superficie. Se produciría, pues, un descenso de la temperatura de entre diez y veinte grados (es un hecho obvio el descenso de cinco a veinte grados entre el día y la noche) y una disminución de la radiación solar

(incluso al menos del 1%) sobre la superficie terrestre a causa de los aerosoles troposféricos, lo que impediría la fotosíntesis durante unos meses en el hemisferio norte. Y cuando empezase a clarear, tendrían lugar las reacciones fotoquímicas que producirían ozono cerca de la superficie durante varios meses, con sus perniciosos efectos sobre los seres vivos.

Entre los autores que predicen estas nefastas consecuencias se encuentra el grupo dirigido por el famoso doctor Sagan, que advierte que las mismas serían especialmente dañinas si la guerra tuviese lugar en el invierno tardío o al principio de la primavera, cuando lo que «toca» es una mejora del tiempo (PENNER, 1986). Entre otras muchas cosas, se perderían las cosechas, los lagos y embalses podrían helarse dificultando el suministro del líquido vital, se contaminaría radiactivamente la cabaña animal, así como la pesca, etc., y todo ello añadido a los desastres provocados por las propias explosiones nucleares. Estos daños también redundarían muy negativamente en los países del Tercer Mundo, cuya alimentación y tecnología depende, como ya hemos señalado anteriormente, de los países ricos del norte. Desde que apareció este modelo, el interés de otros grupos científicos por hallarle defectos ha sido notable. Así, se le critica que ignore los efectos estacionales, el efecto *feedback* de las nubes y los efectos de los vientos oceánicos suavizadores del clima de los continentes.

6.6.5. Las ofensas antroposféricas y el desconocimiento humano

Como dicen algunos autores, «estamos ofendiendo a nuestro ambiente a un ritmo más rápido que el de nuestra comprensión del mismo». Una de estas «ofensas» es el aumento del CO₂ y de los otros gases traza. Una prueba palpable de este aún menguado conocimiento de los complicados procesos climáticos la constituyen los numerosos «parece», «quizá» y condicionales empleados en este capítulo. Puede ser que el papel interpretado por el océano sea el de Cenicienta. Un mayor contacto entre oceanógrafos y climatólogos, sin que se olvide la aportación de los estudiosos de las otras envolturas terrestres, biólogos y geólogos (fig. 48), es quizás uno de los paradigmas

más claros de la, tantas veces repetida, necesidad de interrelación entre las distintas disciplinas científicas. ¿Seremos capaces de desentrañar el efecto del hombre en la modificación del clima antes de que éste lleve a cabo su propio experimento con nosotros y nuestros descendientes? Esta es la cuestión aún a desentrañar cuando nos acercamos al siglo XXI.

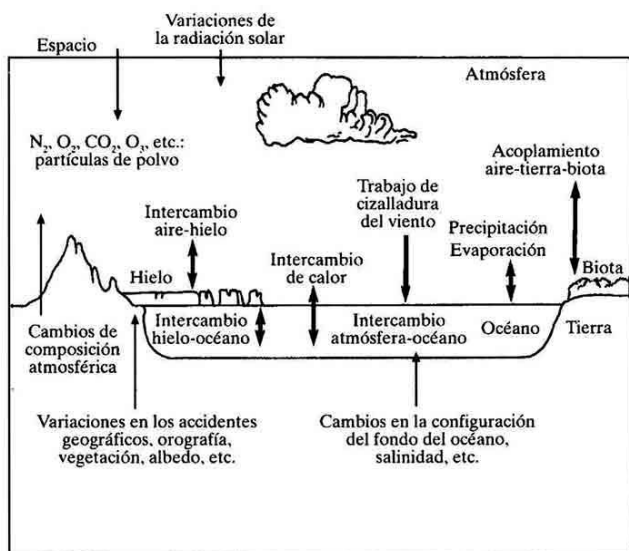


Fig. 48. Complejidad de las interacciones entre la tierra, el mar, el aire y el hielo, las cuales afectan al funcionamiento de la máquina climática. (Modificado de GATES. 1979.)

6.7. CONSERVACION DE LA BIOSFERA

En líneas muy generales, las medidas a tomar ante todos estos problemas y para la conservación de la biosfera y la misma antroposfera son diversas: no extensión de los cultivos a aquellas zonas de las que no se pueda esperar una producción continua, es decir, por ejemplo, evitar la roturación de la selva tropical; comprensión de la importancia de la fauna y la flora salvajes como fuente de alimentos y de diversidad genética, y

para la conservación de la naturaleza, dado su papel regulador; creación de reservas semiprotegidas para el estudio y depósito de información genética; reutilización en lo posible de los recursos minerales; investigación y lucha contra la contaminación; modificación de las actuales tendencias de la población humana, etc. La mayor parte de estas acciones se debe llevar a cabo en los países pobres. Pero no les podemos exigir que paguen ellos; deben hacerlo los ricos, en bien de la biosfera y por supuesto en beneficio propio.

Tampoco se debe caer en el extremo de impedir cualquier transformación del medio ambiente; las demás especies también lo transforman. Se debe procurar, eso sí, hacerlo racionalmente, teniendo en cuenta las leyes de la ecología, las leyes de la vida. Cabe recordar aquí que los ecosistemas no están tan precariamente contruidos que la extirpación de una especie opere como la primera pieza de dominó que hace caer miles de fichas colocadas artísticamente. De hecho, la extinción es el destino de todas las especies. La cuestión es y será utilizar los recursos energéticos y materiales renovables, y de manera que generen la mínima cantidad posible de residuos. Se debe tender por tanto a la utilización de fuentes de energía limpias, sistemas de transporte más eficientes y menos contaminantes y procesos industriales de mínimo coste ambiental, y a la canalización de parte de los recursos energéticos hacia la conservación.

6.8. GAIA, LA MADRE TIERRA

Todas estas cuestiones y problemas, preocupantes desde el punto de vista humano, pierden relevancia observados desde la óptica del planeta. En este sentido, es especialmente atractiva la hipótesis, ya repetidamente citada, de Lovelock sobre la capacidad de la vida, adquirida desde los primeros estadios de la evolución, de controlar globalmente el ambiente para adecuarlo a sus necesidades. Se trata de la visión de la Madre Tierra, Gaia, como unidad de autorregulación.

<i>Gas</i>	<i>Cantidad %</i>	<i>Flujo en mega- toneladas</i>	<i>Medida del desequilibrio</i>	<i>Posible función incluida en la hipótesis Gaia</i>
Nitrógeno	79	300	10^{10}	Aumento de la presión Extinción de incendios Alternativa del nitrato marítimo
Oxígeno	21	100.000	Ninguno. To- mado como referencia	Gas de referencia ener- gética
Dióxido de car- bono	0,03	140.000	10	Fotosíntesis Control cli- mático
Metano	10^{-4}	1.000	Infinito	Regulación del oxígeno Ventilación de la zona anaerobia
Oxido nitroso	10^{-5}	100	10^{13}	Regulación del oxígeno Regulación del ozono
Amoníaco	10^{-6}	300	Infinito	Control del pH Control climatológico (épocas remotas)
Gases azufrados	10^{-6}	100	Infinito	Transportes de gases del ciclo del azufre
Cloruro de metilo	10^{-7}	10	Infinito	Regulación del ozono
Yoduro de metilo	10^{-10}	1	Infinito	Transporte del yodo

Nota: En la cuarta columna, infinito significa más allá de los límites del cálculo.

Tabla 11. Algunos gases del aire y su posible función en la hipótesis de Gaia. (Según LOVELOCK. 1983.)

De hecho, durante la presencia de la vida —miles de millones de años—, las condiciones físicas y químicas de la mayor parte de la superficie del planeta no se han desviado demasiado de las más favorables para ella. Como consecuencia, la Tierra es muy diferente de otros planetas; sus aguas, su atmósfera (tabla 11) e incluso algunas formaciones continentales, son el resultado del metabolismo de la costra viva, que es la que en realidad ha cambiado a lo largo de la evolución. Si el hombre se excede en sus depredaciones, la especie más amenazada es la propia, y su desaparición sólo sería un episodio más en la actuación del mecanismo de regulación que permitiría al planeta, una vez liberado del hombre, seguir su autoorganización. El hombre parece, de momento, más capaz de acabar consigo

mismo que con la vida del planeta. También parece capaz de seguir incrementando su dominio sobre la biosfera, y si no se cae de la cresta, puede llegar a cubrir el planeta y regular y organizar el complejo de materia y organización biosférica en el espacio y el tiempo (véase el epílogo).

VII. LA ANTROPOSFERA ACTUA SOBRE EL CANAL GENÉTICO DE LA BIOSFERA

7.1. LA BIOTECNOLOGIA

Cuando pensamos en los avances tecnológicos, lo primero que nos viene a la mente son los ordenadores y la ingeniería genética. El microchip es un artificio para tratar información de extraordinaria trascendencia en el canal cultural de la evolución antroposférica, mientras que la biotecnología actúa o puede actuar, también de manera extraordinaria, sobre el canal genético de esa evolución. Además, la biotecnología puede producir materiales: combustibles, medicinas, alimentos, productos químicos, plásticos, etc. Ello la ha llevado, aparte de a aparecer continuamente en los periódicos y en los medios audiovisuales de comunicación, a mover cantidades considerables de dinero en las principales bolsas del mundo.

Sin embargo, el hombre viene utilizando la biotecnología y los microbios desde hace milenios. El pan, el queso, el vino, son productos de la actividad de los organismos. Pero hasta hace muy poco la utilización de los microbios era muy empírica, pues no se habían podido ver ni manejar directamente.

Desde las primeras observaciones de Leeuwenhoek se abrieron grandes perspectivas en el mundo de la biotecnología, entendida no sólo como ingeniería genética, sino de forma más general como tecnología que utiliza microorganismos o células obtenidas de vegetales o animales, pero que excluye las actividades llevadas a cabo con plantas o animales completos, propias de la agricultura o de la ganadería.

7.2. EL MATERIAL GENÉTICO Y SU EXPRESIÓN

A pesar de la gran diversidad de seres vivos, un solo tipo de material genético determina el desarrollo, estructura y función de todos los organismos. Es el ADN, ácido desoxirribonucleico, que posee, las dos capacidades básicas inherentes a su función: la reproducción y multiplicación por Un lado, y la codificación de los caracteres por otro.

El ADN está constituido por dos cadenas que se enrollan para formar una doble hélice (fig. 49). Cada una de ellas está formada por nucleótidos enlazados de manera covalente (fuerte), mientras que enlaces de hidrógeno (débiles) posibilitan la asociación de una cadena con la otra. Sólo hay cuatro tipos de nucleótidos, según tengan las bases adenina, citosina, guanina o timina. La frecuencia de una de las cadenas determina la de su complementaria, dado que sólo son posibles las combinaciones de adenina con timina y de citosina con guanina.

Cuando la célula u organismo ha de dividirse, el enzima ADN- polimerasa separa las dos hebras y cada una sirve de molde para la formación de nuevas cadenas complementarias respetando las reglas de apareamiento de bases. Así se obtienen réplicas fieles que se transmiten a las células y organismos descendientes.

Aunque las reacciones enzimáticas son extremadamente complejas, el código genético es muy sencillo. Toda la información genética de que dispone la célula está contenida en la secuencia lineal de los nucleótidos del ADN. Es como un alfabeto de cuatro letras: A, C, T y G. Las palabras (codones) se construyen con tres letras y codifican los aminoácidos; las frases (genes) están formadas por codones y codifican las proteínas, unidades estructurales y funcionales de los seres vivos formadas por aminoácidos. De hecho, un gen no se traduce directamente en una proteína. Antes debe ser copiado (transcrito) en un ARNm (ácido ribonucleico mensajero) que luego es traducido en una proteína según el código genético (fig. 50).

También hay signos de puntuación en estos mensajes, así como mecanismos de regulación de la expresión, bien conocidos los de los organismos más primitivos, pero poco conocidos los de plantas y animales.

Una vez descubierto el material de la herencia y su funcionamiento, rápidamente ha surgido el interés de profanarlo, naciendo así la ingeniería genética.

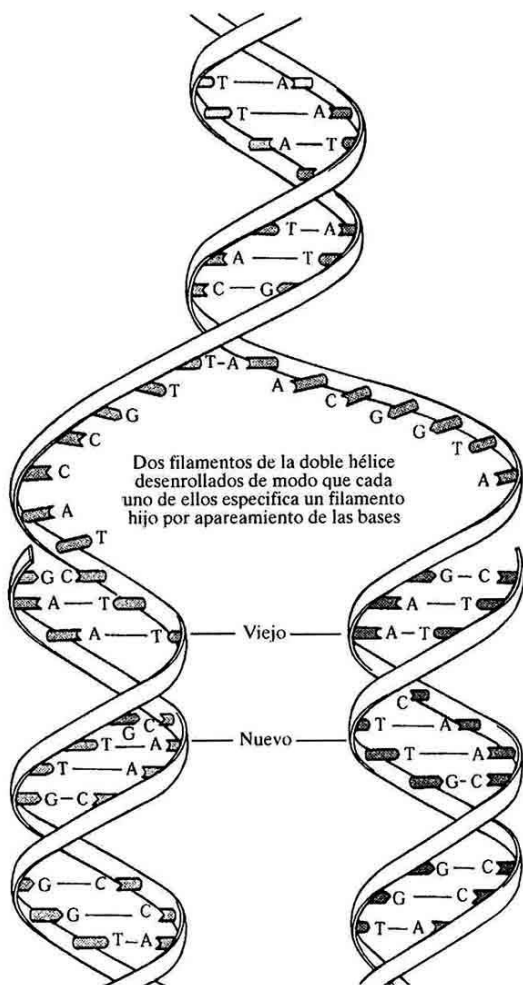


Fig. 49. La doble hélice del ADN.

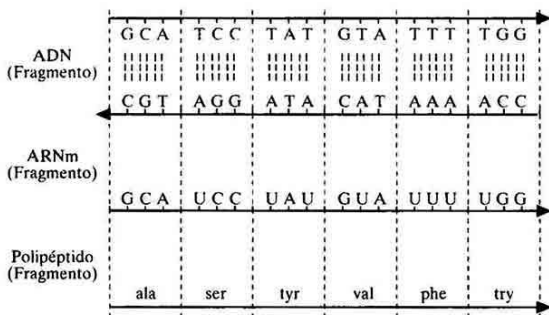


Fig. 50. Relaciones lineales de las secuencias de nucleótidos del ADN, el ARN mensajero y la secuencia de aminoácidos de la proteína.

7.3. LA INGENIERÍA GENÉTICA

La ingeniería genética, *strictu sensu*, es una tecnología en virtud de la cual se empalman fragmentos genéticos de orígenes diversos se introducen en microorganismos u organismos superiores. En el primer caso, se aprovecha la extraordinaria capacidad de multiplicación y el activo metabolismo de las bacterias para obtener grandes cantidades del gen o de su producto de expresión puro y sin contaminación. En el segundo, se pretende que los organismos superiores adquieran el gen y la capacidad de expresarlo.

7.3.1. Los instrumentos

El ingeniero genético utiliza básicamente dos instrumentos para llevar a término estas operaciones: los enzimas y los vectores. Los enzimas de restricción cortan las cadenas de ADN en lugares específicos y producen extremos monocatenarios complementarios con capacidad de unirse con otros ADN de origen diferente. Son el instrumento para cortar y unir ADN. Los vectores o vehículos incorporan el ADN recombinado y lo introduce en otros organismos para que se automultipliquen y

expresen. Los vectores más utilizados son plasmidios, pequeñas moléculas de ADN bacteriana con la capacidad replicativa autónoma, y los virus.

7.3.2. Un ejemplo ilustrativo

Veamos un ejemplo de cómo se utiliza esta tecnología en la obtención de factores de coagulación sanguínea. Cuando nos herimos, una serie de factores actúa en cascada sobre el fibrinógeno para convertirlo en fibrina, que forma un tapón e impide que nos desangremos. Los enfermos de hemofilia carecen de alguno de estos factores de coagulación, así que se les debe suministrar el factor que no sintetizan para que no corran peligro de desangrarse. Con la ingeniería genética puede producirse el factor en gran cantidad, sin contaminación y a un precio mucho menor (fig. 51). Para conseguir el gen que codifica este factor se extraen los ARNm del hígado sano, que es donde se sintetiza. Mediante un enzima se obtienen los ADN complementarios. Con enzimas de restricción se incorporan a plasmidios que se introducen en bacterias. Éstos se siembran y se obtienen muchas colonias, cada una de las cuales lleva incorporados genes, pedazos de ADN, que codifican las proteínas del hígado, disponiéndose así de un banco de genes hepáticos. Existen muchas técnicas para reconocer las colonias que han incorporado el gen que se busca. Una vez hallado, los pasos siguientes ya corresponden a la actividad industrial realizada mediante cultivos en fermentadores para maximizar la producción.

7.3.3. Aplicaciones

La ingeniería genética, tecnología de manipulación, intercambio y transferencia genética, tiene unas enormes posibilidades de aplicación y repercusión en diferentes campos. Además, disponer de secuencias genéticas en gran cantidad y de las herramientas ahora citadas reviste un extraordinario interés científico y posibilita el estudio cada vez más preciso del material de la herencia.

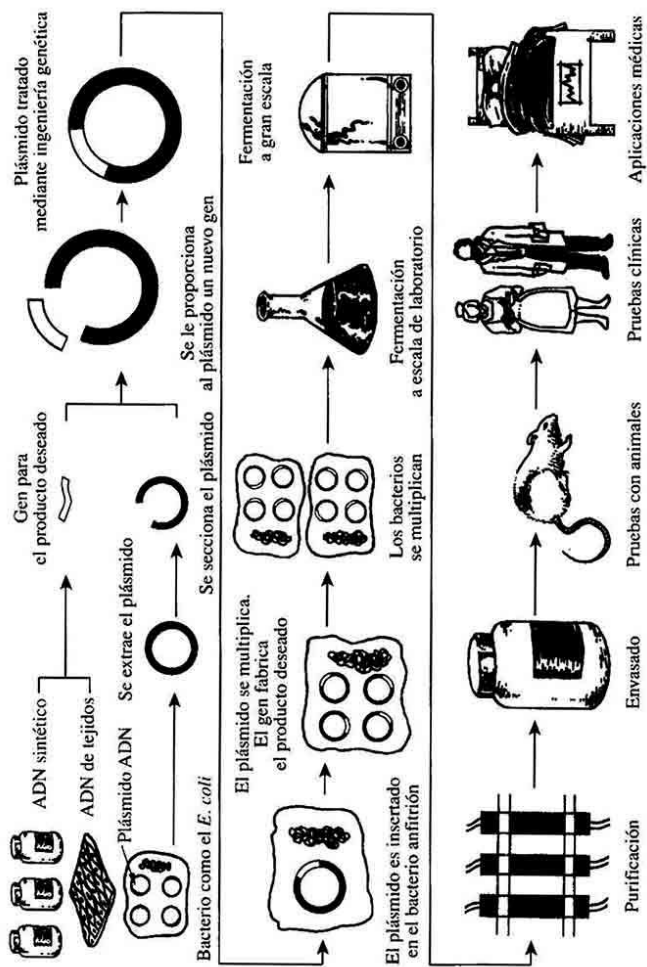


Fig. 51. Etapas en la producción, mediante ingeniería genética, de una proteína, el factor IX de coagulación de la sangre.

Hitos de la biotecnología

- 6000 aC. Empleo de levaduras para la fabricación de vino y cerveza.
- 4000 aC. Pan fermentado producido con ayuda de levaduras.
- 1521. Los aztecas cosechan algas lacustres como fuente de alimento.
- 1670. Se beneficia el cobre con ayuda de microorganismos, en Río Tinto (Huelva).
- 1680. Anton van Leeuwenhoek observa por vez primera los microorganismos con ayuda de su nuevo microscopio.
- 1876. Louis Pasteur reconoce unos microorganismos extraños como causa de las perturbaciones de la fermentación de la cerveza.
- 1890. Se utiliza el alcohol por primera vez en la historia como combustible de motores.
- 1897. Eduard Buchner descubre que los enzimas extraídos de la levadura pueden convertir el azúcar en alcohol.
- 1910. Se establecen sistemas de purificación a gran escala de las aguas residuales, empleando microorganismos.
- 1912-1914. Se obtienen tres importantes productos químicos (acetona, butanol y glicerina) a partir de microorganismos.
- 1928. Alexander Fleming descubre la penicilina.
- 1944. Empieza la producción de penicilina a gran escala.
- 1953. Se descubre la estructura en doble hélice del ADN.
- 1950-1960. Se introducen antibióticos nuevos.
- 1962. Comienza en Canadá la extracción de uranio con ayuda de microorganismos.
- 1973. El gobierno de Brasil inicia un vasto programa para sustituir el petróleo por alcohol.
- 1973. Primeros experimentos de ingeniería genética con éxito.
- 1975. Se obtienen por vez primera los hibridomas que producen anticuerpos monoclonales.
- 1975. Se discuten y perfilan en los Estados Unidos las normas de conducta con respecto a la ingeniería genética.
- 1976. El norteamericano National Institute of Health adopta las normas de conducta para la ingeniería genética.
- 1980. Se autoriza a la Rank Hovis McDougall a comercializar en el Reino Unido alimento de origen fúngico para alimentación humana.
- 1980. El Tribunal Supremo de los Estados Unidos dictamina que se pueden patentar los microbios obtenidos mediante ingeniería genética.
- 1981. Se permite, en los Estados Unidos, inyectar anticuerpos monoclonales con finalidades de diagnóstico.
- 1981. La compañía biotecnológica Cetus alcanza una marca histórica en Wall Street (115.000.000 de dólares) en su primera oferta pública al accionariado.
- 1982. En los Estados Unidos y el Reino Unido se autoriza que la insulina obtenida mediante ingeniería genética se pueda utilizar en el tratamiento de la diabetes humana. 1984. Se autoriza el empleo de interferones

de origen animal en la lucha contra las enfermedades del ganado.

Objetivos inmediatos de la biotecnología

Mediados del decenio de 1980

Autorización del empleo de la hormona del crecimiento, obtenida mediante ingeniería genética, para el tratamiento del enanismo.

Uso del interferon para el tratamiento de algunas enfermedades víricas.

Utilización generalizada de los anticuerpos monoclonales en el diagnóstico clínico.

Introducción de la vacuna contra la hepatitis obtenida mediante ingeniería genética.

Producción de nuevos antibióticos por fusión celular.

Producción industrial de colorantes y diversos productos químicos elaborados por algas.

Empleo de proteínas obtenidas mediante ingeniería genética para tratar congestiones cardíacas y fracturas.

Utilización de anticuerpos monoclonales para aumentar las defensas corporales frente al cáncer u otras enfermedades.

Preparación de nuevas vacunas contra la glosopeda.

Empleo de hormonas del crecimiento para aumentar la producción de carne y leche en el ganado vacuno.

Materiales fundamentales para la industria del plástico obtenidos a partir de microbios.

Finales del decenio de 1980

Empleo del interferon para el tratamiento de determinados tipos de cáncer.

Obtención de más productos químicos industriales producidos por microbios.

Decenio de 1990

Los microbios resultado de ingeniería genética ayudan en la extracción del petróleo del subsuelo.

Empleo masivo de microbios para la extracción de metales en las industrias de tratamiento de desechos.

Producción a pequeña escala de hidrógeno a partir de bacterias.

Utilización de anticuerpos monoclonales para guiar los medicamentos anticancerosos hacia los tejidos malignos.

Nuevas razas de cultivos creadas mediante ingeniería genética son capaces de elaborar sus propios fertilizantes y resistir la sequía y las enfermedades.

Tabla 12. Hitos, usos y objetivos de la biotecnología. (Según PRENTIS, 1986.)

La ingeniería genética no es sólo una gran esperanza —o una gran amenaza—, es ya una importante realidad en muchos campos de la vida antroposférica. En otros, existen menos esperanzas de las que proclama una excesiva propaganda.

7.3.3.1. Industria y minería

Como técnica de producción, la ingeniería genética requiere muy poca mano de obra, ya que son las colonias de microorganismos, sin pretensiones de ninguna clase, las que hacen el trabajo. El coste económico y el consumo energético son muy reducidos. Resulta especialmente interesante en la industria farmacéutica, por la posibilidad de creación de nuevos medicamentos y de disminución del coste de producción de otros ya conocidos. Por ejemplo, el interferon, agente antivírico y quizás anticanceroso que se obtiene a partir de la sangre y de otros tejidos humanos a un precio aproximado de 28.000 pesetas por unidad (precio de 1985), cuesta unas 180 pesetas (1985) obtenido mediante ingeniería genética. También se está estudiando la aplicación de la ingeniería genética a la química, la petroquímica, la minería, la alimentación, etc. En el campo de la producción de energía, va a hacer posible la obtención de combustibles renovables, incluido el metano, el hidrógeno y el alcohol, así como de sustancias elaboradas por microorganismos que ayuden a extraer petróleo del subsuelo. En la industria, proporcionará nuevas fuentes de plásticos, pinturas, fibras, adhesivos; microbios para la extracción de metales de las rocas sólidas, mediante solubilización y posterior lavado de los compuestos metálicos, o para la absorción de los metales del agua marina, y nuevos microorganismos tratados genéticamente para el control de la contaminación (véase 6.3.1).

7.3.3.2. Agricultura y ganadería

También en el ámbito de la agricultura ha despertado la ingeniería genética muchas esperanzas. Pero conviene de nuevo ser prudente a la hora de valorarlas. En la actualidad ya se está cerca de introducir genes, y por lo tanto caracteres nuevos, en plantas. Pero en algunos casos, quizá servirá de poco. Por

ejemplo, la resistencia a un parásito, carácter que ya era factible introducir con los métodos de la genética clásica, deviene inoperante por la aparición de nuevas formas de parásitos. Además, muchos de los caracteres interesantes en producción vegetal están controlados por grupos de genes, mucho más difíciles de manipular que un solo gen. Y en el caso de que se consiguiese, podrían presentarse efectos desfavorables, como ocurrió con los genes opacos del maíz, que incorporaban aminoácidos esenciales para la nutrición en sus proteínas de reserva, pero que introducidos por selección genética tradicional, produjeron un rendimiento inferior, unos granos mecánicamente frágiles y unas plantas más sensibles a los parásitos. Parece aún un sueño transferir los más de 17 genes que codifican la fijación del nitrógeno atmosférico, lo cual haría innecesario abonar los campos de cultivo con nitratos. Cuando se consiga, habrá de considerarse si compensa el 20 o 30% de disminución de la cosecha que se pagará como precio de la fijación. Lo que sí tiene un interés inmediato, en cambio, es introducir los genes que codifican la resistencia a los herbicidas en las plantas cultivadas.

Entre los proyectos y estudios destaca también la posibilidad de conseguir cultivos adaptados a la sequedad o al exceso de sales, aceleradores de crecimiento de animales de granja, compuestos de microorganismos cultivados sobre materiales de desecho o incluso sobre otro tipo de materias orgánicas como las sintéticas.

La ganadería aún puede resultar más beneficiada por los avances de la biotecnología, pues criar animales ha sido siempre más difícil que cultivar plantas. Los avances anteriores a nuestra era nos han permitido seleccionar los mejores animales domésticos como reproductores. La inseminación artificial y la fertilización *in vitro* van a posibilitar grandes cambios. Si la comparamos con la agricultura directa, la crianza de ganado tiene en sí misma una especie de ineficiencia que es compensada por la variedad de productos obtenidos. De ahí el uso de hormonas (tanto en animales como en vegetales). La biotecnología permite elucubrar, con cierto fundamento, en el sentido de que quizá se podrán desarrollar las estructuras vivas del

cuerpo que más interesen e incluso fabricar hojas artificiales, en lo que sería la transformación futura del mundo, la que llevaría a la eliminación de la biosfera, totalmente sustituida por la antroposfera, los seres humanos y su biotecnología.

7.3.3.3. *Medio ambiente*

La ingeniería genética puede ser extremadamente útil en el control de la polución. Pero debe dotarse a los microorganismos utilizados de una vulnerabilidad intrínseca, como puede ser la debida a un defecto metabólico que les permita vivir y desarrollarse solamente cuando se les proporcione algún nutriente en particular, el cual les sea retirado cuando su trabajo haya terminado. Podrían terminar adaptándose a la vida en libertad y crear problemas; por ejemplo, los bacterias encargados de eliminar el plomo polucionante no serían nada agradables cuando empezasen a agujerear las tuberías.

7.3.3.4. *Biomedicina*

En medicina, la ingeniería genética ha proporcionado o va a proporcionar en breve nuevos tratamientos contra las enfermedades cardiovasculares, el cáncer y la diabetes, mejores antibióticos y vacunas más baratas, tanto antivíricas contra la gripe, la hepatitis o el SIDA, como antiparasitarias contra la malaria y la enfermedad del sueño; también ha hecho posibles importantes mejoras en los trasplantes de órganos, en los análisis y diagnósticos y en el tratamiento genético contra enfermedades hereditarias, como la hemofilia.

Las aplicaciones de esta tecnología culminan en el trabajo sobre genes humanos con la intención de introducirlos en las células de los pacientes con enfermedades genéticas. La factibilidad de este proceso espera aún una confirmación plena que sin duda alguna no tardará en llegar. De hecho, en un organismo muy cercano a nosotros, el ratón, se están consiguiendo avances extraordinarios. Los embriólogos son ya capaces de manipular el embrión de este mamífero, congelarlo y recuperarlo vivo, separar sus células, mezclarlas, mantenerlas vivas *in vitro*, etcétera.

En esta línea es muy destacable el que ya se hayan obtenido ratones clónicos. Para ello se extrae el núcleo de una célula del ratón, se inyecta en un óvulo previamente anucleado y se desarrolla un organismo genéticamente idéntico al original. Es decir, si esto se hubiese hecho, de acuerdo con el ejemplo más efectista que se suele poner, con una célula de Adolf Hitler, se habrían conseguido individuos que serían copias genéticas de dicho personaje.

En la discusión ética que origina la utilización de la ingeniería genética en el hombre, hay que tener en cuenta la diferencia entre la aplicación de terapéutica genética a individuos determinados y el tratamiento genético de los neonatos. Simplificando el problema, encontramos dos tendencias extremas en el seno de la sociedad científica: por un lado la de quienes abogan por la aplicación de esta tecnología a la producción de individuos superiores; por el otro, la de quienes demandan una declaración de inviolabilidad del patrimonio genético humano. En este caso, parece que un criterio ecléctico, distinto según se aplique al individuo o al neonato, es el más aceptado.

7.3.4. Impacto social y económico

Es evidente que esta facultad de fusionar material genético de organismos diferentes y de propagar la recombinación obtenida, tanto en bacterias como en animales y plantas, significa un avance extraordinario en el desarrollo tecnológico del hombre, una revolución como mínimo comparable a la industrial del pasado siglo o a la informática actual. Estas perspectivas han conducido a la aparición de numerosas empresas de biotecnología, los éxitos de las cuales han inducido a las multinacionales químico-farmacéuticas a adquirirlas y potenciarlas. Incluso algunos gobiernos se han comprometido en ella, o están considerando hacerlo, para no perder el control de una tecnología de tan gran potencial que ya en 1986 movió, sólo en Estados Unidos, muchos millones de dólares. Las predicciones acerca del conjunto del mercado biotecnológico cifran en cientos de miles de millones de dólares el movimiento del mismo para dentro de unos años, en el 2000.

7.4. LA INGENIERIA GENETICA Y LA SEGURIDAD AMBIENTAL

El concepto de riesgo cero es algo virtualmente desprovisto de sentido en cualquier campo de la actividad humana. Incluso el simple acto de respirar entraña el riesgo de inhalar gérmenes patógenos y enfermar. La ingeniería genética es una actividad antroposférica, y en consecuencia comporta cierto riesgo para la misma antroposfera y la biosfera. En 1986, biólogos moleculares y ecólogos se reunieron en Estados Unidos para celebrar un congreso sobre la utilización de organismos obtenidos o tratados mediante ingeniería genética. El objetivo de la reunión era favorecer el diálogo entre estos dos colectivos, en apariencia muy alejados, y caracterizados por el desconocimiento mutuo de las actividades respectivas, y estudiar las precauciones a tomar antes de liberar al medio ambiente dichos organismos, especialmente los de uso agrícola. La polémica sigue abierta desde entonces, y aunque no se ha llegado a un acuerdo sobre los procedimientos a seguir acerca de su uso, tras el congreso, por lo menos, se ha abierto el diálogo. Diálogo difícil, pues los ecólogos piensan que los biólogos moleculares saben muy poco de los sistemas que quieren invadir con sus organismos y no tienen en cuenta las posibles consecuencias adversas, y por contra, los ingenieros genéticos opinan que algunos ecólogos son demasiado alarmistas. Dado el prestigio de que goza la biología molecular en nuestra sociedad, no me parece mal terciar aquí en favor de la no tanpreciada ciencia ecológica y recordar que, si se prescinde de ella, se puede caer en el error de inventar nuevos mundos que difícilmente pueden funcionar o, lo que es peor, que funcionen a medias.

En la mencionada reunión se pusieron sobre la mesa de trabajo varios casos concretos, algunos de los cuales siguen apareciendo de forma continuada en las revistas científicas.

Uno de ellos es la utilización de mutantes de la bacteria *Pseudomonas syringiae* que no producen la proteína iniciadora de la formación de los cristales de hielo, de modo que confieren resistencia a las heladas a las plantas que colonizan. Se han probado sobre muchas y diversas plantas en invernaderos sin

encontrar toxicidad. En este caso, y a pesar de que su utilización agrícola a gran escala fue bloqueada por la acción judicial emprendida por un famoso activista norteamericano, Jeremy Rifkin, los ecólogos no se han mostrado demasiado críticos, dado que estos mutantes están presentes en el medio ambiente de forma natural y al parecer sin causar daño alguno.

Otro experimento, algo más polémico, es la producción de un pesticida mediante un organismo obtenido como resultado de transferir el gen de la deltaendotoxina del conocido bacteria *Bacillus thuringiensis* a otro bacteria, el *Pseudomonas fluorescens*, que puede colonizar las raíces de plantas como el maíz. Las plagas sensibles a este pesticida microbiológico son las nocivas del orden *Lepidoptera*. Sin embargo, los ecólogos y algunos biólogos moleculares solicitan que se compruebe su inocuidad en relación con los insectos beneficiosos —como las abejas— y su no persistencia exagerada en el ambiente. El proceso se encuentra ahora en esta fase, aunque la administración estadounidense parece que aún no ha dado el beneplácito a las pruebas de campo.

Otra de las cuestiones planteadas, también agrícola, es la de las nuevas clases de herbicidas (sulfonilureas, imidazolinonas, glifosfatos, etc.), efectivos a dosis mucho menores que los tradicionales, pero poco selectivos, lo que los hace tóxicos también para las plantas cultivadas a las que interesa, por tanto, hacer más resistentes. Para ello, los genes de resistencia a estos herbicidas, hallados en bacterias, se están transfiriendo mediante plásmidos a todo tipo de plantas cultivadas, tabaco, maíz, algodón, tomate, etc. Es importante en este caso estudiar si esos genes serán posteriormente transferidos o no a las malas hierbas.

Uno de los argumentos a favor de la ingeniería genética es la utilidad que tendría introducir la ya mencionada capacidad de fijar nitrógeno en las plantas superiores. Podría constituir una ventaja aparente e inmediata para la agricultura, pero la ecología nos permite considerar el problema desde otro ángulo. El nitrógeno y el fósforo constituyen los elementos más importantes de la biosfera, pues son los más escasos y por lo tanto los limitantes de la producción. La fijación de nitrógeno puede

tener valor en los sistemas agrícolas forzados, pero es un mecanismo energéticamente caro —consume casi la tercera parte de la producción del vegetal— y, además, generalizar tal fijación a toda la biosfera puede que no reportara las consecuencias trascendentales que a veces se le atribuyen. Por otra parte, la tendencia a ir perdiendo nitrógeno gaseoso se ha dado en la biosfera desde el principio y ha contribuido sustancialmente a la formación de la atmósfera actual.

La alteración del virus de la viruela con la inserción de genes de varias vacunas —herpes, estomatitis, hepatitis B, etc.—, es otro de los experimentos acometidos. La nueva vacuna resulta barata, no es necesario mantenerla refrigerada y se administra fácilmente mediante escarificación en lugar de inyección; además, el virus obtenido es menos activo que el usado desde hace muchos años sin que se haya extendido al medio natural, por lo que su utilización parece poco peligrosa ambientalmente.

Existe una gran cantidad de regulaciones y leyes sobre productos químicos tóxicos y los ecólogos tienen mucha experiencia en el control biológico, pero no hay nada de ello sobre la regulación de los organismos obtenidos o tratados mediante ingeniería genética. Los argumentos a favor de establecer normas relajadas se basan en el hecho de que esta tecnología no constituye nada nuevo: los genes se intercambian entre los seres vivos de forma natural. Parece, además, que el trabajo de laboratorio con estos organismos es bastante seguro y no ha producido ningún accidente importante. Sin embargo, los partidarios de medidas más restrictivas califican de desorientadora la comparación de las transferencias esporádicas de la naturaleza con las experimentales, que producen enormes cantidades de nuevos organismos, introducidos luego en el ambiente de forma que puedan sobrevivir y prosperar. Y aunque los ecólogos puedan a veces predecir qué ocurrirá con las nuevas especies introducidas en el ambiente, han aprendido que se experimentan sorpresas y son conscientes de lo mucho que desconocen algunos pretenden que se siga caso por caso a qué organismos afectará el obtenido mediante estas técnicas, cómo se moverá y dispersará en el ambiente y qué probabilidad existe de que sus

nuevos genes sean transferidos a otras especies. Probablemente es una pretensión vana. Sin embargo, y de hecho, la capacidad de evolución genética de la naturaleza es inmensa y resulta poco o nada aumentada por las manipulaciones humanas; lo que decide, aún y ahora, es la selección.

Los ecólogos tienen aspectos positivos que ofrecer a los biólogos moleculares, pues han aprendido a plantearse cuestiones que no se les ocurren a éstos y pueden ayudarles mucho a diseñar organismos realmente efectivos. Parafraseando a algunos miembros de dicho colectivo, se puede afirmar que si la ingeniería genética es el «filo», la ecología puede ser la «navaja».

7.5. LA ANTROPOSFERA NECESITA MANTENER LA DIVERSIDAD GENÉTICA

«Estábamos contentos, boquiabiertos... El maíz híbrido de alto rendimiento era hermoso, la producción parecía que iba a ser excepcional. Pero repentinamente llegó la enfermedad. No habíamos pensado que aquello pudiese pasar», manifiesta un técnico agrícola norteamericano recordando el verano de 1979, cuando la niella o clavel del trigo (*Agrostemma ghitago*), plaga de los cereales, destruyó la mitad de la cosecha de maíz del sur de Estados Unidos.

Este maíz se había obtenido por métodos de selección genética, que se aplican también a verduras, frutas y otros tipos de cultivos, y a la mejora del ganado. Se creía que con el uso de estas técnicas desaparecerían los problemas de hambre en el mundo por mucho tiempo, pero la naturaleza no se deja manipular con tanta facilidad: a medida que se iban obteniendo especies más uniformes, aumentaba su vulnerabilidad, como pasa con la descendencia de personas consanguíneas.

De ello se deduce que la antroposfera debe conservar la máxima diversidad de especies y por tanto genética. De esto ya se dan cuenta las grandes potencias científicas, que son también las grandes potencias político-económicas mundiales (URSS y EE.UU.). las cuales almacenan en sus silos y en sus granjas

miles y miles de especies vegetales y animales diferentes, en forma de semillas de plantas y parejas de ganado, de tal manera que se han convertido en mercancías de «valor tan alto» como la energía nuclear o el petróleo.

Se ha llegado así a situaciones un tanto paradójicas e incluso tristes, como el hecho de que especies tales como la gallina «ibérica» o «extremeña», o semillas de maíz, trigo o avena propias y características de países del Tercer Mundo, sólo se encuentren en los Estados Unidos, país del cual dependemos nosotros y dependen los países subdesarrollados en lo que hace a la mejora genética. Esto es sumamente inquietante, porque otorga a un grupo reducido de potencias (URSS, EE.UU., el Reino Unido...) la posibilidad de controlar la estrategia alimentaria mundial.

Es por eso que conviene conservar las comunidades vegetales y animales con la máxima diversidad posible. Desde mi punto de vista, ésta es una de las razones más importantes cuando se habla de la conservación de la naturaleza, la cual se convierte así no sólo en un medio de ocio y bienestar físico y psíquico, sino también en una fuente esencial para nuestra subsistencia en un porvenir no muy lejano. Ello es así a pesar de que también sea cierto que las especies potencialmente más explotables parecen estar entre las que persisten en un entorno humanizado.

7.6. LOS INDIVIDUOS COPIA: LOS CLONES

Otro tema con grandes expectativas es el ya también mencionado del clonaje u obtención de grupos de individuos genéticamente idénticos. Es ésta una técnica sobre la que todos hemos leído u oído hablar en referencia a la especie humana: las primeras experiencias de fertilización *in vitro* en nuestra especie dieron como fruto la famosa niña «clónica» o «probeta», que en realidad no es clónica, sino que simplemente ha sido criada en sus primeras fases embrionarias en una especie de

incubadora en lugar de en la matriz materna. Ahora se ha subsanado el error conceptual y ya no se habla de bebés clónicos sino de fecundación *in vitro*. De hecho, la aplicación de la técnica real de clonaje en el hombre —la obtención de grupos de individuos idénticos al de su origen—, la veo aún algo lejos, a pesar de que, como ya se ha mencionado, se ha llevado a cabo con otros mamíferos, los ratones. También la veo llena de peligros éticos y sociales.

Fue en el año 1961 cuando por primera vez se pudo obtener un verdadero adulto clónico, normal y fértil, trasplantando un núcleo de una célula adulta a un óvulo anucleado (sin núcleo) de una rana (*Xenopus*) mediante unas técnicas muy complicadas que hacía que sólo se pudiese alcanzar el éxito en anfibios. La posibilidad de llevar a cabo estos trasplantes nucleares, es decir, la obtención de clones en mamíferos, ha despertado gran interés y todavía mucha más especulación. Pero las células huevo de mamíferos son miles de veces más pequeñas que las de rana, lo que complica las técnicas. Aun así no hay en principio razones obvias para que los trasplantes nucleares en mamíferos no puedan ser logrados, y por eso se han conseguido ya en los ratones.

A pesar de las dificultades aún existentes, no está pues muy lejana su aplicación a la agricultura y sobre todo a la ganadería, a la que puede revolucionar en los próximos años.

En agricultura, ya hace mucho tiempo que el mantenimiento de plantas de valor agrícola para propagación vegetativa (los esquejes, por ejemplo) constituye una rutina, y esta técnica se podría ampliar a cultivos de plantas a los que hasta ahora no se podía aplicar.

Pero en lo que hace a los animales vertebrados, hasta muy recientemente no se ha podido obtener un adulto completo a partir de una parte de otro adulto. Es por eso que se están desarrollando intensos estudios, especialmente en la Universidad de Carolina del Norte y en la de Liverpool, orientados a la obtención de clones. Los avances que ello reportaría en el campo de la ganadería son extraordinarios; pensemos por un momento en lo que representaría poder obtener miles y miles de animales iguales a uno que nos interesara por sus características. Por

ejemplo, de la vaca que produjese más leche del país podríamos sacar unas células, extraerles los núcleos, implantarlos en células huecos y obtener así un clon de vacas idénticas que producirían la máxima cantidad de leche posible. Esto mismo podría hacerse con cualquier clase de ganado.

La obtención de clones sería también muy útil en experimentos inmunológicos y otológicos, en los que la variación individual necesita ser mantenida al mínimo.

Por otro lado, y lo que es seguramente más importante para el destino de la antroposfera, la aplicación de estas técnicas a la especie humana comporta unos problemas y unas implicaciones de gran trascendencia ético-social que pondrán a prueba la responsabilidad humana ante los nuevos avances científicos. Aquí podemos recordar el *Mundo feliz* de Aldous Huxley, y meditar acerca del mismo.

VIII. EL FUTURO: EL REINO DE LA EXPONENCIAL

8.1. EXPONENCIALES AVANCES TECNOLÓGICOS

La nuestra es una generación privilegiada porque asiste a una enorme revolución de la condición humana. Un pequeño ejemplo: incluso en un país no integrante del Primer Mundo, o por lo menos no de los cinco grandes, como el nuestro, los ordenadores están llegando ya a todas las oficinas y hogares — yo estoy escribiendo estas líneas en un microordenador, cómodamente sentado en mi casa—. Otros ejemplos: el hombre empieza a colonizar el espacio exterior con satélites y estaciones orbitales; la ingeniería genética y la biotecnología en general están avanzando a un ritmo tal —mi vecina ya se inyecta insulina obtenida mediante esta tecnología— que ya nos hallamos cerca de poder diseñar y rediseñar los seres o las «cosas vivas».

Los poderes del hombre se han hecho extraordinarios, fruto de una evolución cultural lamarckiana que actúa exponencialmente. Ahora pueden convertirse en magníficas herramientas, pero también en fuerzas destructoras según el empleo que de ellos se haga.

Los cambios, lentos al principio, se han acelerado exponencialmente y en consecuencia han sido más rápidos en los últimos cien mil años, aún más en los últimos cien y todavía mucho más en los últimos diez, dotando al *Homo sapiens sapiens* de esa tecnología y esa habilidad para aprovechar fuentes de energía que le confieren una extraordinaria capacidad de dominio.

En el último siglo transcurrido hemos incrementado en más de un millón de veces nuestra velocidad de comunicación, en cien veces nuestra velocidad de locomoción y en mil veces nuestro consumo energético. Durante las dos últimas décadas

hemos multiplicado por millones de veces la velocidad del proceso de datos y la eficiencia de las armas.

Es difícil dejar de preguntarse si estos cambios tan repentinos no nos han colocado en la cresta de la ola. ¿Qué hay detrás de la cresta de la ola? No parece que podamos comunicarnos a mayor velocidad que la de la luz, ya alcanzada por la radio y la televisión, ni que podamos viajar alrededor de la Tierra a mayor velocidad que la orbital, ya alcanzada por las sondas espaciales; no parece tampoco posible resolver el problema demográfico emigrando al espacio, ni podemos morir dos veces por armas nucleares. O solucionamos los problemas a medida que surjan, o desaparecemos. Las soluciones posiblemente requerirán una pérdida de libertad por la obligación de hacer exactamente lo necesario para garantizar la supervivencia. ¿Morirá con todo ello la curiosidad y la inteligencia?

8.2. PREVISIONES

Nosotros no somos el producto final de nada. El cambio acompaña al tiempo desde el principio del universo. Cambiar o perecer. ¿Adónde iremos a partir de aquí? Nuestro Sol está destinado a quedarse sin combustible, a hincharse hasta convertirse en una estrella gigante roja y a engullir varios de sus planetas, quizá la Tierra entre ellos, pero esto no parece que vaya a ocurrir hasta dentro de otros cinco mil millones de años, un lapso de tiempo incomprensible para nosotros, que no podemos contar hasta mil millones ni aunque nos pasásemos toda nuestra vida en el empeño. Pero ¿cuál es nuestro futuro a plazo más corto, miles o centenares de años? Predecir el futuro, aunque fascinante, no es posible ni en lo que respecta al año que viene, así que mucho menos para dentro de veinticinco años o un siglo. Existen demasiados factores y azares desconocidos. Sin embargo, vamos a considerar unos cuantos posibles escenarios que por lo menos pueden resultarnos instructivos, y cuyo conocimiento puede incluso hacernos reducir, si obramos adecuadamente, la probabilidad de futuros indeseables.

Como el hombre es parte de la biosfera, cuando la pone en peligro está luchando contra sí mismo. «El mundo es tu cuerpo», dice Watts.

El principal efecto de las actividades antroposféricas ha sido redirigir, a través de las interacciones con la biosfera, la producción neta de los ecosistemas. El hombre ha sustituido a los consumidores naturales, lo que ha aumentado espectacularmente el bienestar de algunas personas, aunque para el planeta haya representado, en realidad, un aumento muy considerable de la población antroposférica. Hay que recordar que más comida representa más bocas, no más estómagos llenos. ¿Puede la población y la energía que utiliza seguir creciendo exponencialmente como ha hecho hasta ahora? De acuerdo con nuestro símil inicial entre la curva de crecimiento de la antroposfera y la forma de las olas, ¿estamos en la cresta de una ola que va a romper o podrá crecer aún más? ¿Este aumento exponencial de la acción de la antroposfera —basado en el canal cultural— sobre los canales genético y ecológico de la biosfera va a llegar a eliminarlos?

Los entendidos se dividen en dos grupos, con todos los matices intermedios, al igual que la gente en general: el de los que ven el futuro con una completa confianza en la nueva tecnología, y el de los que propugnan la necesidad de una reorganización completa de la sociedad, política y económicamente global, para tratar la limitación de recursos que se avecina, y no perecer en el empeño.

Cuando en el futuro —yo estoy convencido, con mi natural talante optimista, de que llegaremos a él— la gente vuelva la vista hacia atrás, hacia la revolución bioindustrial de finales del siglo XX y principios del XXI advertirá como principal contribución el paso de una sociedad basada en materiales y energía no renovables a una basada en la biotecnología, la informática y una fuente de energía duradera, la del Sol. Si se llegara a fabricar generadores de H_2 con una eficiencia del 10% de la energía solar, bastaría con una superficie como la de España para satisfacer las necesidades energéticas mundiales del presente. Parece una idea fuera de lugar, de ciencia ficción, pero ¿se ha pensado en la velocidad con que se ha avanzado en los últimos

diez años en biotecnología, por ejemplo? ¿Se ha pensado en la reciente aparición de muchos nuevos materiales superconductores que van a revolucionar nuestra utilización de la energía, y con ello nuestra sociedad?

8.3. EL AUMENTO IMPLACABLE DE LA POBLACION

Nada en la historia humana es tan extraordinario como el crecimiento exponencial de la población (fig. 2) resultado de la agricultura moderna y de los avances de la medicina y la higiene. Hace sólo doscientos años que Malthus y otros llamaron la atención sobre los problemas del crecimiento y regulación de la población, y en 1987, poco más o menos —la incertidumbre se debe a la existencia de numerosos países que no llevan censos precisos— hemos llegado a los cinco mil millones de habitantes. Para entender lo que significa exponencial sólo hay que considerar lo siguiente: el hombre moderno, que apareció hace unos cincuenta mil años, no alcanzó los mil millones hasta 1810, y en cambio alcanzó los dos mil en 1925, los tres mil en 1955, los cuatro mil en 1976 y los cinco mil en 1987. Hoy han nacido más de 200.000 personas, es decir, aproximadamente la mitad de la población de una provincia como Lérida. Mañana ocurrirá igual. En dos días tendremos otra nueva provincia de Lérida en lo que se refiere a población.

Esto es especialmente acuciante en los países del Tercer Mundo. Hacia el año 2000, cuatro quintas partes de la población mundial estarán concentradas en los países subdesarrollados. Si no ocurre nada peor, lo que se prevé es el desarrollo de regímenes totalitarios para controlar los problemas generados por este aumento. «Los derechos del individuo habrán de ceder paso a los de la comunidad», dicen algunos especialistas. Pero, si cabe, aún más preocupante que esto son los más que probables conflictos entre los países densamente poblados. De ello ya hay numerosos ejemplos en el presente y en el pasado.

Existen otras desigualdades asimismo preocupantes. La población urbana crecerá mucho más que la rural. Además, la mitad de la población de los países subdesarrollados será menor

de veinte años, con lo que ello implica de demanda de educación y de empleo, y de momento de inercia del crecimiento de la población, que no se detendrá fácilmente, por poco que los seres humanos se reproduzcan. Precisamente uno de los métodos de regulación de la población con mayor éxito consiste en retardar la edad de casamiento—a veintiocho años en los hombres y veinticinco en las mujeres en China parece haber dado buenos resultados—: pero ayuda todavía mucho más el bienestar económico y la mayor educación. Y si no, no hay más que observar lo que ocurre en Europa occidental o en los Estados Unidos (fig. 52).

Este crecimiento espectacular es el resultado de la secuencia de descubrimientos por los que las formas de vida inteligente deben pasar para desentrañar la estructura de la materia viva. Se han descubierto y utilizado las bacterias —y se ha suprimido la enfermedad— antes que los núcleos atómicos —y la tecnología nuclear—, más pequeños, en los que se basa la emigración interestelar que algunos prevén para un futuro no muy lejano.

Los escasos recursos existentes a escala global deben ser conservados. No hay una abundancia sin límites, la Tierra no es infinita. La última crisis de energía (debida a precios elevados, que no a escasez) ha contribuido a que se tomara la buena dirección de desarrollar tecnologías de bajo consumo energético y de reciclado de materiales.

Actualmente, pese al hambre reinante en muchos países, la producción de alimentos sería suficiente para dar de comer a todos los habitantes de la Tierra, aunque un 20% se pierde por almacenamiento deficiente o por despilfarro, y la distribución no es racional. Pero el problema irá de mal en peor, ya que no es probable que la producción alimentaria (véase 5.3.2) avance al mismo ritmo que la población.

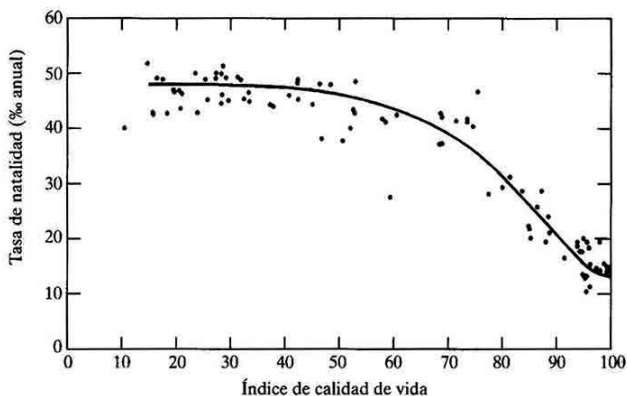


Fig. 52. Relación entre la calidad de vida y la tasa de natalidad. (De BROWN. 1977.)

Hoy en día no hay ningún país del mundo en que la gente no pueda ser alimentada con sus propios recursos. El hambre puede ser eliminada transformando las relaciones sociales. La salvaguarda del ambiente agrícola y la alimentación son objetivos complementarios. La seguridad alimenticia no puede medirse en términos de reserva de grano o en base a datos de producción, pues no está amenazada por las masas hambrientas, sino por las elites que controlan los recursos. Se puede doblar la producción de alimentos per cápita de un país y, aun así, la gente puede pasar hambre. El aumento en los precios de exportación de los productos agrícolas puede hacer aumentar el hambre. La agricultura de un país no debería utilizarse como recurso de exportación, sino, en primer lugar, para producir comida para los propios habitantes. Para escapar del hambre se debe, pues, redistribuir primero el control.

Pero en la actualidad nos hallamos ante estos crecientes números de habitantes, y uno no puede sino asustarse, pues la Tierra no crece, y cada vez necesitaremos más espacio y más recursos. Son muchos los optimistas que afirman que los avances científicos y tecnológicos permitirían una población de hasta cincuenta mil millones de habitantes. Estas personas ven

en la expansión de las tierras cultivables la posibilidad de multiplicar varias veces las cosechas y su producción, con lo que deducen que existe la posibilidad de soportar de cinco a diez veces la población actual; pero las cosas no son así de fáciles. Para aumentar la superficie cultivable, cosa que requiere temperatura, precipitación, suelo y topografía adecuados, los agricultores han colonizado incluso las pendientes mediante el uso de terrazas. A menudo esto conduce a la erosión y a otros problemas. Surgirían además numerosas limitaciones económicas y políticas, y sobre todo se perderían la calidad y el mismo suelo (EHRlich *et al.*, 1977), se alterarían los ciclos biogeoquímicos y aumentarían los residuos tóxicos. Mayores zonas de regadío resultarían energéticamente muy caras de construir y de operar, aparte de los problemas generados en la calidad del agua (salinización, eutrofización, erosión, pesticidas). Sin embargo, la irrigación debe aumentar mientras el balance entre los beneficios y los costes sea aún superior a 1. El aumento de la fertilización debe llevarse a cabo de forma bien estudiada. Donde con seguridad aumentaría la producción es en los países subdesarrollados, en los que los niveles de fertilización son menores y las necesidades alimenticias mayores. Parece que será energéticamente aconsejable intercalar cultivos fijadores de nitrógeno.

La posible futura fabricación de alimentos sintéticos requeriría energía, de manera que sería un remedio problemático.

Dudo de que aumentar tanto la producción sea posible, aparte de que no veo nada clara la calidad de vida que se disfrutaría en esas condiciones. Aun así, o aunque se llegase, por biotecnología, a la fabricación de estructuras vegetales y animales «artificiales», si sigue la tasa actual de crecimiento se llegaría a ese número de cincuenta mil millones a finales del siglo XXI o principios del XXII. ¿Y después, qué? ¿Enviaríamos al espacio, a la Luna, a Marte o a otros planetas, o a estaciones orbitales el exceso de población? Siguiendo con este razonamiento, Asimov llega a afirmar, para que nos demos cuenta, si es que ya no lo hemos hecho, de lo que significa exponencial, que si eso fuera posible ocuparíamos la totalidad del universo hacia el año 6500. Todo eso no parece ni remotamente

posible. Antes, pues, de que el hambre, las guerras, las epidemias o cualquier otra desgracia maltusiana detenga el crecimiento, parece que la población debería ser estabilizada. Esto es fácil de conseguir en los países del Norte, que ya se mueven en este sentido, pero no lo es en los países subdesarrollados, donde el crecimiento y su momento de inercia son mayores y donde las necesidades que genera son más difíciles de satisfacer. Aunque la regulación sea una cuestión interna de cada Estado, las consecuencias sobre los recursos y derechos de los otros hacen que entren en conflicto. Así pues, se trata de un problema global. O quizás el aumento de la población no sea en realidad un problema en sí mismo. La humanidad estuvo mucho tiempo sin que su número aumentara tanto. Ahora crece porque puede. Lo que se discute aquí es cuánto tiempo va a seguir pudiendo, y en lo que se refiere al momento actual, estamos ante un problema de vecinos, un problema entre vecinos ricos y vecinos pobres,

Los países ricos, por las implicaciones de su misma riqueza, ya han rebajado sus tasas de crecimiento poblacional; pero no así los pobres, en los que está aumentando exponencialmente la población —porque aún se puede—, lo que redundará en su acentuada pobreza.

La pobreza es la causa de la sobrepoblación, no a la inversa. Las dos estrategias, los dos caminos que siguen son, pues, muy distintos (fig. 52). Se trata al fin y al cabo del principio de la selección natural y de la diversificación de las estrategias. En esas diferencias está uno de los mayores escollos que pueden hacer coronar la cresta y romper la ola.

8.4. LA SOLUCION ESPACIAL Y LAS CIVILIZACIONES GALÁCTICAS

Algunos científicos hablan de una posibilidad de evitar el problema de la limitación de recursos: la colonización de planetas cercanos y la búsqueda, al mismo tiempo, de civilizaciones galácticas. Se habla de Venus. Marte y aun de otros planetas similares al nuestro situados en distintos sistemas solares.

Las características físicas de nuestro planeta no son nada especiales en el universo. Hay muchísimos como él; en el peor de los casos, centenares. Sin embargo, otros científicos ponen en duda la posibilidad de vida inteligente en otros planetas. Sostienen que la de la Tierra es producto de accidentes astrofísicos y bioquímicos inconcebiblemente afortunados, cuya repetición es muy improbable en cualquier otro lugar de la galaxia o del universo. Para ellos, la búsqueda es insensata e injustificada y representa malgastar los recursos.

Pero si algo distingue al *Homo sapiens sapiens* es la exploración, el deseo innato de saber quiénes somos, de dónde venimos y a dónde vamos. No se puede refrenar el mismo atributo que nos convierte en humanos.

El espacio que nos rodea puede estar inundado de señales emitidas por civilizaciones extraterrestres. Si conociéramos la frecuencia y dirección adecuadas podríamos conseguir el avance más prodigioso desde el nacimiento del lenguaje. En este punto, merece la pena recordar que el mundo está lleno de señales que no percibimos. Así, las criaturas pequeñas viven en un mundo diferente al nuestro, con diferentes fuerzas y condiciones físicas (véase 3.1.3.3) que no nos son familiares. Dentro de nuestra misma escala existen otros organismos que perciben sensaciones que tampoco nos son familiares (sonidos de distintas frecuencias, como los murciélagos; visión del ultravioleta, como muchos insectos). Lo paranormal es el refugio de los charlatanes, pero las percepciones parahumanas existen en los pájaros, las abejas y bacterias.

8.5. EL FUTURO ENERGÉTICO

La energía es el denominador común de las sociedades tecnológicas. Es necesaria para el funcionamiento de automóviles, trenes, aviones, teléfonos, radios, televisores, la confección de ropa, la adecuación de la vivienda, la medicina, la nutrición, la edición de libros, el uso de computadoras, la extracción de recursos, la fabricación de artículos, etc. Cuando se agote el pe-

tróleo (fig. 53), ¿qué combustible utilizaremos? La fisión nuclear, técnica empleada en las centrales nucleares, produce desechos radiactivos altamente tóxicos para el ecosistema y para nuestros genes. Menos desechos deja la fusión nuclear, que tiene lugar en las estrellas, pero que tardaremos aún en dominar. Lo que parece ilógico es que no se inviertan grandes esfuerzos en la energía solar.

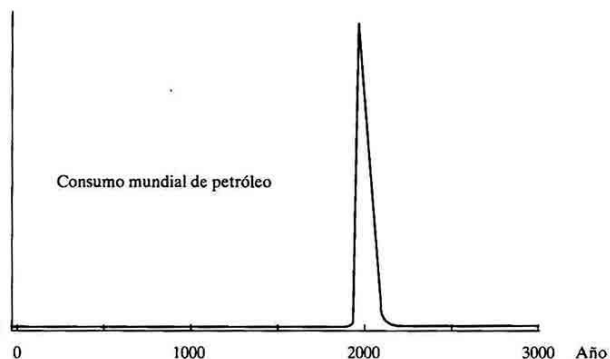


Fig. 53. Evolución del consumo de petróleo en la historia de la antroposfera.

No nos estamos quedando sin energía, sino sin petróleo y gas baratos, sin dinero para pagarlos, sin capacidad para eliminar los residuos del gasto energético y sin tiempo para ajustarnos a las nuevas realidades. Hemos buscado durante décadas una energía nuclear barata y segura, en un sueño ya casi desvanecido, seguramente porque el precio del petróleo no subió lo bastante. La fisión nuclear es vista por la sociedad como algo más cercano a la carrera armamentista y a un amplio abanico de intrincados problemas relacionados con ésta, que a la solución del problema de la energía; de ahí que la oposición a la misma crezca semana a semana en todo el mundo. No estamos más cerca de reemplazar la energía fósil ahora que hace unas décadas. A pesar de la tan cacareada crisis de energía de los años setenta no se ha pasado a la acción con suficiente empuje. El petróleo y el gas natural son los puentes a las nuevas tecnologías energéticas, y estamos quemando nuestros puentes. A

medida que pasa el tiempo somos cada vez menos flexibles. Se ha progresado en las tecnologías del carbón, pero las restricciones ambientales y de recursos necesariamente limitan al carbón a un papel transitorio. La posibilidad de la fusión nuclear está aún lejana por su carestía y complejidad, y además las primeras generaciones de reactores de fusión seguramente serán mixtos, fusión-fisión, para alimentar el plutonio.

De las otras fuentes de energía, la solar y sus derivadas (el viento, el agua y la biomasa) aparecen como las más atractivas. Un mundo nuclear devendría más centralizado y autoritario que uno basado en la energía solar. Generaría productos carcinógenos, mutagénicos y tóxicos, con posibilidad inherente de error humano y de malevolencia; y, relacionado inevitablemente con las bombas atómicas, presenta un futuro sombrío.

8.6. UNA AMENAZA AUN PRESENTE: LA GUERRA NUCLEAR

Una de las poderosas herramientas an troposféricas es, pues, la energía nuclear. Constituye también, por su posible utilización bélica, un enorme peligro.

La autodestrucción, por ejemplo en forma de holocausto nuclear, podría ser provocada por muy pocas personas, ocurriría de manera casi instantánea y podría incluso exterminar la vida humana sobre la Tierra.

Ya en 1980 la ONU anunció que el mundo se gastaba en armamento un millón de dólares por minuto. Explosivos nucleares, armas «inteligentes», bombas de neutrones, misiles, sustancias químicas y biológicas capaces de eliminar naciones enteras. ¡A cada persona nos toca más de cinco toneladas de TNT! ¿Es que estamos locos? De hecho, el Pentágono denomina Destrucción Mutuamente Asegurada (en inglés. MAD, sigla equivalente a la palabra que en esa lengua significa «loco») a su política armamentista destinada a mantener la paz por la disuasión. Si se utilizan esas armas, es fácil que se eliminen la vida y las obras del hombre.

Con semejante capacidad destructora es casi seguro que los supervivientes de las explosiones nucleares sucumbirían bajo la precipitación radiactiva, el caos económico social, la ausencia de ozono y el invierno nuclear.

Luego queda el problema, tan importante como el anterior, o incluso más, de las naciones pobres, las más numerosas y con mayor población, que no creen tener nada que perder, y que pueden pensar que encontrarán un remedio para su deteriorada situación económica induciendo catalíticamente la guerra nuclear. No se debe olvidar tampoco la posibilidad de utilización de las armas nucleares por parte de grupos terroristas.

La gran ley que rige las relaciones humanas ya fue anunciada por Hobbes en *Leviathan* (1651): «donde los hombres disponen de bienes más escasos que sus deseos, es muy probable que luchen».

El implacable crecimiento de la población, especialmente en el Tercer Mundo, con la consiguiente limitación de bienes, se mueve indiscutiblemente en el ámbito de las premisas de esa ley.

8.7. AMENAZAS LEJANAS PERO PLAUSIBLES

Aunque resolvamos todos los problemas anteriores con éxito, todavía nos encontraremos con nuevas amenazas, quizá más lejanas, pero plausibles. Consideremos las siguientes.

8.7.1. ¿Al «mundo feliz» por la ingeniería genética?

La mortalidad infantil disminuye, la duración de la vida aumenta y no sólo sobreviven los más fuertes, sino muchísimos de los que antes perecían. La medicina cura las enfermedades contagiosas, pero parece que a la larga va a fomentar las hereditarias. La continua degeneración genética a que estamos abocados tras los logros de la medicina, que hacen posible la supervivencia y reproducción de individuos tarados que de otra forma morirían, es otro de los interrogantes del futuro de la especie humana. Ésta es una afirmación desagradable por las connotaciones morales y sociales que le pueden seguir; pero es

así. Quizá la biotecnología repare esos defectos genéticos, pero ello sería señal de que nos hallábamos ante un nuevo problema, puede que mucho más grave, el de que el cáncer antroposférico deje de regirse por las leyes biosféricas. Con el hombre, la evolución ha empezado a manipular la propia evolución. Empezamos a controlar tanto el medio ambiente como el gen. Tenemos la ingeniería genética como extraordinaria herramienta, pero ¿quién la controlará? ¿Qué especies, razas o tipos de individuos se deberá producir? ¿Quién impedirá la clonación de ejércitos de profesionales de todo tipo?

Existe además el peligro de que la limitación de la población mundial conduzca en la práctica a cierto modo de selección genética, lo que podría dar lugar a nuevas formas de persecución de negros, judíos, árabes, gitanos, checos o indios americanos. Como dice Luria, de justificarse por la voluntad de Dios, las leyes de la selva o los requerimientos del Pentágono o del Kremlin, tal vez se pasara a justificarse por los imperativos de la eugenesia.

La etapa siguiente consistiría en corregir o sustituir los genes en el material hereditario que los individuos transmiten a sus descendientes. Esto requiere la introducción eficiente de los genes correctores en las células sexuales, con dificultades que hoy aún parecen grandes, pero que pueden desvanecerse a medida que avance la biología molecular.

¿Se podrá actuar también sobre el comportamiento de los seres humanos? Por ejemplo, se ha hablado de eliminar la agresividad humana olvidando a menudo que en su origen no todo es biologismo: es fácil que se deba de manera importante a condicionantes sociológicos. Otra opinión es biologismo fatalista para justificarla. No hay razón alguna para dudar de que los conflictos de los seres humanos tienen una fuente importante en la estructura de sus sociedades y en la superestructura concomitante de creencias, mitos y prejuicios.

La procreación «artificial» que tanto se discute, especialmente por la existencia de investigadores que piden una moratoria y por el documento del Vaticano sobre el tema (1987), va a crear disociaciones entre sexualidad y procreación, entre concepción y filiación, entre filiación biológica y afectiva, etc.;

asimismo va a cambiar los conceptos de paternidad y maternidad y va a transformar los valores y las instituciones básicas de la sociedad. Hoy en día, ya han surgido problemas con la fecundación *post mortem* y con las madres de alquiler. La sociedad del futuro, si es que se llega a ella, puede ser muy distinta de la actual, y por desgracia puede que mucho menos libre.

8.7.2. Un poco más de ciencia ficción: ¿será la nueva especie *Homo biochip* la dominadora de la Tierra futura?

Los circuitos de silicio, los ordenadores, están incrementando su capacidad a un ritmo también exponencial.

Numerosas películas de ciencia ficción presentan robots que adquieren características humanoides e incluso «se enamoran». ¿Será la inteligencia artificial, el siguiente paso en la evolución cósmica? ¿Reemplazará el silicio al carbono? Los ordenadores son mucho más rápidos y almacenan mucha más memoria, mucha más información. Ya vencen a cualquier ser humano en el juego de las damas y a casi todos en el del ajedrez. En nuestros medios de comunicación se debate la posibilidad de que puedan construirse máquinas capaces de pensar o comprender. Si aprenden, ¿por qué no enseñarles creatividad? Algunas personas afirman que los ordenadores nunca tendrán cualidades humanas como la voluntad, la intuición, la emoción y la conciencia, que no son más retrasados mentales extraordinariamente rápidos. Además, cuando lleguen a incomodarnos, siempre queda el recurso de desenchufarlos. Otras discrepan y consideran inevitables los ordenadores pensantes.

Todo esto suena excesivamente a ciencia ficción y a filmes de aventuras, pero también sonaban así las novelas de Julio Verne.

En este sentido, y entrelazados entre la informática y la ingeniería genética, tenemos a los biochips o dispositivos electrónicos moleculares (fig. 54), elementos que quedarían a salvo de los impulsos electromagnéticos generados por explosiones nucleares. La perspectiva de construir sistemas de dirección y control que seguirían actuando después de un holocausto nu-

clear no ha pasado inadvertida a los militares. ¡Ojo a los biochips! Éstos surgieron de la búsqueda de sistemas que superasen los límites físicos impuestos por los problemas de laminación del silicio; de la necesidad de no depender de otros países para disponer de materiales escasos como el galio, el indio o la plata, que se requieren, además del abundante silicio, para la fabricación de chips, y de la observación de que las proteínas guardan cierta similitud con los circuitos integrados actuales y además como sistemas biológicos, tienen la capacidad fascinante de reproducirse y organizarse.

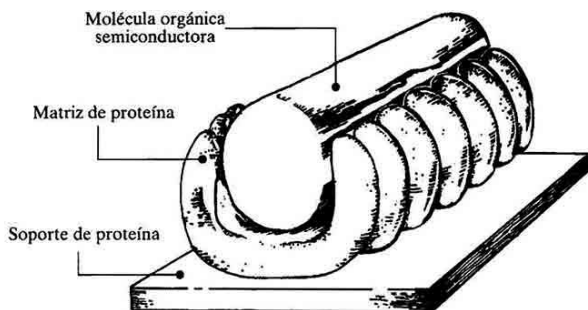


Fig. 54. La unidad básica de un biochip: una molécula orgánica semiconductora inserta en una matriz de proteína. Las señales eléctricas pueden pasar a través del semiconductor, de la misma manera que un microchip usual de silicio permite el paso a través de ciertas partes del artilugio. (De PRENTIS, 1986.)

Ya se han dado los primeros pasos en la utilización de biochips. Se han construido biochips en los que las proteínas han organizado el metal de modo que han establecido el cableado microscópico de circuitos electrónicos, biosensores que detectan sustancias químicas y que se estudia implantar en ciegos, motores moleculares movidos por actina y miosina musculares y ATP, etc. En el camino hacia los ordenadores biológicos falta descubrir uniones químicas que actúen como diodos limitadores y construir circuitos biológicos tridimensionales, pero los científicos y técnicos siguen trabajando...

Quizá la nueva especie *Homo biochip* sea la que vaya a dominar la siguiente etapa del planeta Tierra porque el *Homo sapiens* haya pasado a engrosar el camino de la extinción, ya recorrido por el 99,9% de las formas de vida terrestres.

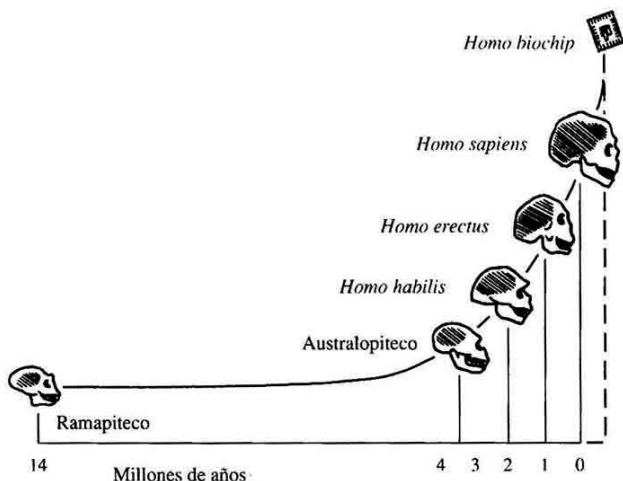


Fig. 55. Evolución del hombre con la nota futurista y de ciencia ficción, provista de cierta plausibilidad, de la especie *Homo biochip* sustituyendo al *Homo sapiens* en la cresta de la ola antroposférica. (Modificado de CMAISSON. 1986.)

8.8. ¿QUÉ HACER?

No obstante las críticas recibidas por algunos de los informes efectuados por el famoso Club de Roma en estos últimos años, es evidente que la Tierra no puede continuar soportando el peligroso crecimiento exponencial actual porque la dirige a la rotura de la ola antroposférica. Dichos informes hacen especial énfasis en las dos grandes brechas que hay entre la antroposfera y la biosfera y entre los ricos y los pobres. A pesar de las diferencias entre los supuestos y las bases de los numerosos modelos (ODUM, 1985yy estudios del mundo futuro (EMMEL,

1977; GRIBBIN, 1981; HAYES, 1977; OPHULS, 1977), existen algunos puntos y conclusiones comunes y consensuados, además de lógicos para la mayoría de las visiones.

- La población y los recursos no pueden crecer indefinidamente en un planeta finito. (Y no lo van a hacer.)
- No se conoce bien dónde está el límite de los recursos, pero una reducción en la tasa de crecimiento reduciría la probabilidad de un desastre. (Aquí entra el forcejeo entre ricos y pobres.)
- El progreso tecnológico es vital, pero también lo son los cambios sociales, económicos y políticos. (Con el lastre de que tienden a aumentar la ligazón y la burocratización y a frenar la dinámica.)
- Hay que eliminar las grandes diferencias entre ricos y pobres. (Pero todos esperan que empiecen los otros.)
- La cooperación es a la larga más beneficiosa que la política competitiva. (Para los que no son capaces de competir.)
- Dada la interdependencia, las mejores decisiones son las globales. (Afectan a todos.)
- Cuanto antes se tomen las medidas correctoras, más baratas y eficaces serán. (Y beneficiarán a los que ahora ya son ricos.)

Sobre la forma de actuar predominan dos puntos de vista que, salvar do las distancias, se corresponden con los de «lo pequeño es hermoso» de SCHUMACHER (1973) y «lo grande es poderoso» de MARGALEF (1979). Es difícil analizar el cociente coste-beneficio de una y otra opción. Los comentarios entre paréntesis incluidos en los diversos puntos reflejan el escepticismo de muchos estudiosos ante estas actuaciones. Lo que sí parece que debe perseguirse, o por lo menos ésta es mi opinión y la de muchos otros, es eliminar en lo posible las ya tan citadas grandes diferencias de nuestra antroposfera: las diferencias de riqueza entre el norte y el sur, entre los ricos y los pobres, entre las sociedades urbanas y las rurales, entre los bien alimentados y los desnutridos, entre los educados y los analfabetos. Ese es quizá nuestro mayor reto como humanidad y, tristemente, no

se puede ser en exceso optimista si la antroposfera no se aparta un poco de las leyes de la biosfera, si no suple con su «tan autoensalzado» cerebro las inexorables leyes de la termodinámica y las ecológicas que de ellas se derivan.

8.8.1. San Mateo, ecología y relaciones internacionales

San Mateo y san Marcos recogen en sus evangelios el principio del que «al que tiene mucho se le dará más y al que tiene poco, aun lo poco que tiene le será arrebatado». Este versículo, aunque sacado de su verdadero contexto e intención religiosos, en los que no pretende incidir este escrito, da mucho que pensar en los diferentes órdenes de la vida. Enuncia el principio germen de la progresiva diferenciación entre sistemas, y es aplicable desde las partículas elementales a las relaciones galácticas. Margalef, en su libro *La biosfera, entre la termodinámica y el juego* (1980), lo introduce en ecología para explicar las diferencias en los sistemas naturales, al constatar que éstas, en lugar de mitigarse, tienden a hacerse más bruscas y acusadas tras la interacción a través de cualquier frontera asimétrica, entendiendo como tal a la que separa dos subsistemas con diferente grado de organización. Por esta propiedad básica de la naturaleza, la información, en su sentido más amplio de estructura y función, aumenta del lado que ya era más complejo y se mantiene igual o disminuye en el menos organizado. El subsistema más complejo mantiene el control del sistema entero, hace mejor uso de la información, la asimila y la conserva mejor y la multiplica relativamente más, e incluso parece alimentarse del más simple, al cual puede llegar a absorber.

La diversa utilización de los recursos por los diferentes organismos conduce a la especialización y diversificación, y en consecuencia a diferentes tamaños y tasas de renovación. Estos factores son los que generan las diferencias en la adquisición de información y en la utilización de la energía. El mayor tamaño proporciona mayor dominio del tiempo y del espacio, y las tasas de renovación lentas favorecen la acumulación de información, primero genética y después cultural. Son los mayo-

res y de vida media más prolongada los que obtienen un balance positivo del intercambio material y energético. Tenemos de todo ello ejemplos paradigmáticos; las relaciones entre el depredador y la presa, entre el zooplancton y el fitoplancton, entre bosques y claros, entre los ecosistemas bentónicos (del fondo de lagos y mares) y los pelágicos (en suspensión en las aguas), entre las especies de estrategia *k* (basada en maximizar la conservación), por ejemplo el mero, y las de estrategia *r* (basada en la maximización de la reproducción), por ejemplo la sardina... La organización espacial de los ecosistemas tiene también su origen en la interacción asimétrica entre elementos de diferente grado de madurez o estadio de sucesión.

Ante este principio general, sin duda expresión de las leyes de la termodinámica, uno cae en la tentación de aplicarlo a los sistemas antroposféricos, aunque sólo sea como mera elucubración de un naturalista y aunque el hombre sea un elemento de la naturaleza en extremo especial. En el panorama internacional se observa el progresivo enriquecimiento de las sociedades avanzadas y el acentuado empobrecimiento de las subdesarrolladas. Parece inmediato cuestionarse sobre la universalidad del principio de las ventajas comparativas del intercambio entre países, enunciado por Ricardo y Mill a comienzos del siglo XIX. Este principio constituye una de las principales armas de los partidarios del librecambismo, contrarios al proteccionismo, y una de las bases del comercio internacional. Dicho principio establece que el intercambio comercial entre dos países es mutuamente provechoso, incluso cuando uno de los dos puede producir todas las mercancías con eficacia absoluta superior, si cada uno de ellos se especializa en la producción de los bienes por los que dispone de ventaja comparativa relativa. El punto cuestionable está en la presuposición de que los sistemas intercambiantes se rigen por las mismas leyes y funciones de producción, cosa que parece evidente que no se cumple cuando los que intercambian son, por ejemplo, Estados Unidos, Alemania o Japón con Bolivia, Guinea o Nepal. De hecho, las relaciones que se establecen son de total asimetría, regidas por tanto por el mencionado principio de san Mateo.

Una vez reconocido esto, parece que la solución a una paulatina y monstruosa división de la humanidad sólo puede basarse en que la filantropía y el buen sentido de los avanzados les dirija a suministrar gratuitamente información y capacidad organizativa, el *know how*, a los países subdesarrollados.

Debe haber un mayor flujo de recursos entre países ricos y pobres para proveer de servicios sociales mínimos a los sectores más pobres no como una acción caritativa, sino como una necesidad de la comunidad mundial. La tarea más urgente en la relación entre ambos mundos es rellenar la enorme brecha económica que les separa. Entonces se podrá estabilizar la población —no hay que olvidar que, tal como están ahora las cosas, para aplicar el control de la natalidad a los pobres sería necesaria la coacción, cosa del todo inaceptable—, y luchar contra la polución internacionalmente, porque, desaparecidas las grandes diferencias, las necesidades serán comunes.

Los recursos ahora no estatales, como la Antártida o los océanos, deben ponerse bajo control internacional, para asegurar que los beneficiarios de su explotación sean también los países pobres.

Aunque los alimentos y la población van a la par a escala mundial, los países ricos tienen mucho más alimento de que consumen, y los pobres mucho menos. También hay opiniones contrarias al suministro de alimentos a los países del Tercer Mundo. Una de las razones que aducen los contrarios a transferir alimentos es que eso origina una dependencia peligrosa y un control político; otra razón que aboga en este sentido, aunque partiendo de una base ideológica opuesta, es la que afirma que los países que no son autosuficientes en alimentación es porque están superpoblados y que la transferencia simplemente perpetúa esa situación insostenible.

Corresponde a economistas y sociólogos, con mayor conocimiento de causa, meditar sobre el principio de san Mateo. Quizá los modelos económicos y sociales deberían ser cambiados, orientándolos a satisfacciones no tan materiales y a cambios cualitativos más que cuantitativos.

Uno de los principales problemas para tratar adecuadamente todas estas amenazantes cuestiones es que se trata de

peligros a medio y largo plazo, cuando los políticos en el gobierno, los empresarios en los negocios, y los líderes sindicales en las fábricas, suelen ser miopes, sólo ven metas a corto plazo

8.9. LA ANGUSTIA DE LA ANTROPOSFERA

La humanidad se está acercando a un límite más o menos cercano según la inteligencia y sentido común con que emplee su poder. Por primera vez en la evolución, una especie advierte la necesidad de regular su propia expansión y también por primera vez una especie puede autodestruirse. Esta conciencia aporta un nivel de referencia para establecer una regulación de tipo *feedback* efectiva. Pero esta referencia varía mucho, y por supuesto es muy diferente en la India que en Canadá, por ejemplo. Hemos alcanzado la capacidad de autodestruirnos y con nosotros a la mayor parte de la biosfera. Pero lo más sorprendente es que nos hemos seudoadaptado a esta nueva situación, o la negamos. Y deberíamos alarmarnos, pues es necesaria la angustia de la especie de que habla el psiquiatra norteamericano de origen británico R. Laing para adoptar las medidas adecuadas y no llegar tarde.

¿Sobrevivirá la antroposfera? Quién sabe. Muchos podemos contestar a esta pregunta con el viejo truco de plantear otra: ¿A quién le importa? Sin embargo, como dijo L. R. Brown (1981), «no hemos heredado la Tierra de nuestros padres, la hemos tomado prestada de nuestros hijos».

Los optimistas afirman que como la tecnología de supervivencia ha tenido mayor éxito del que nunca antes se pudo imaginar, ahora se seguirán superando todos los problemas. Ahora aparecerán nuevas amenazas, pero la pequeña lista que los agoreros hicieron pública en los últimos años se ha convertido de momento en papel mojado. Entre otros motivos, ha sido así porque suponían que todas las desgracias acaecerían simultáneamente. Lo que no deben hacer las amenazas y las predicciones de las mismas es minar nuestro espíritu.

Tampoco hay que exagerar acerca de los problemas que amenazan a la antroposfera con el argumento de que es necesario hacerlo para asustar a la gente, para que las cosas se hagan. La gente se anestesia rápidamente, su angustia desaparece ante la repetición y puede que la fuerza de los movimientos ecologistas sea mínima cuando más se requiera.

8.9.1. La educación

La educación es básica para la defensa ambiental. La comunidad científica y tecnológica debe movilizarse a escala mundial para reducir la ignorancia acerca del ambiente, los recursos, la población y la condición humana.

El crecimiento y los cambios exponenciales van acompañados de una falta de entendimiento y conocimiento del público. Pasan varias generaciones antes de que las ideas fronteras de la ciencia se filtren en el público: aún no hemos digerido por completo las de Darwin y mucho menos las de Einstein y la mecánica cuántica.

Pero es que ni siquiera las clases de elite, académicas, económicas, profesionales y políticas han captado el mensaje ecológico. Quizás el gran enemigo de la antroposfera sea este: el desconocimiento.

Si se mantiene informada a la mayor parte posible de la población, se la implica y se la mantiene así, la articulación de los esfuerzos individuales podrá, crear un futuro sostenible.

EPILOGO

MÁS ALLÁ DE GAIA. HOMENAJE A LOVELOCK

LA ANTROPOSFERA (VIDA-ORGANIZACIÓN) PASA A MOLDEAR LA MATERIA-ENERGÍA

A la vista de todo lo expuesto, pienso que pronto no va a ser todo el planeta el que actúe a modo de organismo que regula las condiciones de la materia-energía para su propio automantenimiento, como establece Lovelock en su teoría de Gaia, sino que la organización resultante, con su cresta, la antroposfera, es la que ahora está pasando a modelar la materia-energía y la propia organización en el espacio. Le faltará luego dominar el tiempo; es posible que ése sea el paso siguiente.

Además de como una ola, podemos considerar la historia de la antroposfera, utilizando el símil de FIENNES (1978), como si el hombre fuera hinchando un globo: los grandes saltos evolutivos o los grandes inventos son como una exhalación que va seguida de una pérdida pequeña de gas, de nuevo una exhalación y una pérdida parcial, y así sucesivamente (fig. 56). Los indicios muestran un globo lleno. Si el globo se nos escapa de las manos puede deshincharse, si lo atamos se habrá llegado al equilibrio, y si seguimos hinchándolo puede explotar en un «big bang» que eliminaría la antroposfera. La obtención de ese equilibrio puede verse implícita en muchas filosofías y religiones, por ejemplo desde la cristiana hasta la budista, pasando por el marxismo y el ecologismo.

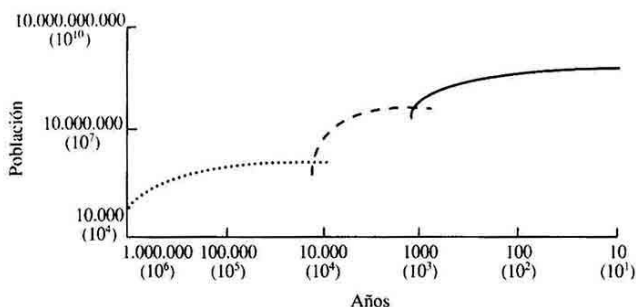


Fig. 56. Grandes saltos de población en la historia de la antroposfera consecutivos a las grandes revoluciones, la cultural, la agrícola y la médico-industrial. Los números están representados logarítmicamente.

Se puede pensar que la opción del equilibrio es la deseable: pero el hombre y la vida están eternamente en movimiento, inmersos en el cambio, que es la esencia de la naturaleza. Aquí donde estoy sentado, en el Alt Empordà, hubo anteriormente un bosque, y antes un océano, y antes quién sabe. En la primera época del universo, la radiación dominaba a la materia. A medida que aquél se expandía y enfriaba, la materia empezó a dominar, formando sucesivamente galaxias, estrellas, planetas y vida. La vida inteligente, alcanzada su fase tecnológica, está ahora pasando a dominar la materia: la organización-vida, resultado del moldeado efectuado en el tiempo por la materia-energía, pasa ahora a regir a la propia materia-energía en un segundo gran salto de la historia del universo (fig. 57). ¿Va a continuar hacia pasos nunca dados previamente, como si de un universo abierto se tratase, o va a terminar como, a otra escala, ha ocurrido con las grandes civilizaciones, en lo que sería propio de un universo cerrado? ¿Se han dado ya estas alternativas en un universo cerrado que se contrae y expande, o ésta es la primera vez en un universo abierto? ¿Quién podrá saberlo? ¿Qué o quién está detrás de todo esto, si es que hay algo o alguien? Después de todo, ¿quiénes somos nosotros para preguntarlo? Algún escéptico afirma que al fin y al cabo nuestra vida, hasta donde nosotros sabemos o podemos comprobar, no es

más que una enfermedad sexual transmitida, con un 100% de mortalidad.

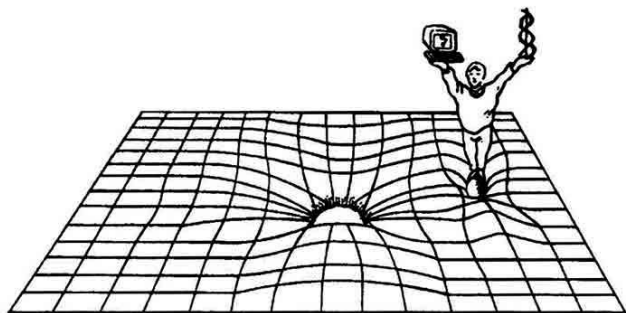


Fig. 57. La antroposfera (organización-vida), resultado del moldeo efectuado en el tiempo por la materia-energía, pasa ahora a regir a la propia materia-energía en un segundo gran salto de la historia del universo.

BIBLIOGRAFÍA

- AGREN. G. I., y B. AXELSSON (1980): «Population respiration: A theoretical approach», en *Ecological Modelling*, núm. 11, pp. 39-54.
- ALEXOPOULOS, C. J., y C. W. MIMS (1985): *Introducción a la mitología*. Barcelona. Omega.
- ÁLVAREZ, L. W., W. ALVAREZ, H. V. ASARO y H. V. MICHEL (1980): «Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. Experimental results and theoretical interpretation», en *Science*, núm. 208, pp. 1095-1108.
- AZCÓN-BIETO, J., J. MURILLO y J. PEÑUELAS (1987): «Cyanide-resistant respiration in photosynthetic organs of freshwater aquatic plants», en *Plant Physiology*, núm. 84, pp. 701-706.
- BENNET, D. P., y D. A. HUMPRIES (1978): *Ecología de campo*. Madrid. H. Blume.
- BERTALANFFY, L. VON (1968): *General systems theory: foundations, development, application*, Nueva York. G. Braziller.
- BESSEMOULIN, P., et al, (1983): *Contaminado atmosférica i meteorología*. Barcelona. Diputació de Barcelona.
- BJÖRKMAN, O., y Y. BERRY (1973): «High efficiency photosynthesis», en *Scientific American* núm. 229 (4), pp. 80-93.
- BRATTSTEN. L. B., C. W. HOLYOKE, J. R. LEEPER y K. F. RAFF A (1986): «Insecticide resistance: challenge to pest management and basic research», en *Science*, núm. 231, pp. 1255-1260.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1979): *Fitosociología*. Madrid. H. Blume.
- BREEMEN, N. V. (1985): «Acidification and decline of central european forest», en *Nature*. núm. 315. p. 16.
- BRITISH MUSEUM (1982): *La natura en acció. Introdució a l'ecologia*. Barcelona. Ketres.
- BROECKER, W. S. (1970): «Man's oxygen reserves», en *Science*, núm. 160, pp. 1537-1538.
- BROECKER. W. S., y T. H. PENG (1982): *Tracers in the sea*. Nueva York. Columbia University,
- BROOKS. J. L. (1946): «Cyclomorphosis in *Daphnia*», en *Ecological Monographs*. núm. 16. pp. 409-447.
- BROWN. A. W. A. (1971): *Pesticides in the environment*. Nueva York. M. Dekker.

- BROWN, H. (1977): «Relating the PQLI to other factors», en *International Development Review*, núm. 19, pp. 36-37.
- BROWN, L. R. (1981): *Building a sustainable society*. Nueva York. Norton.
- BROWN, F. M., y W. BAILEY (1978): *Earth science*, Morristown. Silver Burden.
- BROWN, J. H., y B. A. MAURER (1986): «Body size, ecological dominance and Cope's rule», en *Nature*, núm. 324, pp. 248-250.
- BURGOS, J. J. (1979): «Renewable resources and agriculture in Latin America in relation to the stability of climate», en *Proceedings of the World Climate Conference, WMO*, núm. 537, p. 536.
- CALLIS, L. B., y M. NATARAJAN (1986): «Ozone and nitrogen dioxide changes in the Stratosphere during 1979-84», en *Nature*, núm. 323, pp. 727-777.
- CALVERT, J. G. et al. (1985): «Chemical mechanisms of acid generation in the troposphere», en *Nature*, núm. 317, pp. 27-35.
- CATALÁN, J. (1987): *El Hoc Redó*. Barcelona, Universidad de Barcelona (tesis doctoral).
- CATALÁN, J., y J. PEÑUELAS (1987): «La vegetado algal del riu Fluvià», en *Annals de l'Institut d'Estudis Empordanesos*, núm. 20, pp. 31-47.
- CAUGHLEY, G. (1979): «Eruption of ungulate populations, with emphasis on Himalayan thar in New Zealand», en *Ecology*, núm. 9, pp. 111-122.
- CLAYTON, R. (1973): *Luz y materia viviente. La parte física*. Barcelona, Reverte.
- (1974): *Luz y materia viviente. La parte biológica*. Barcelona, Reverte.
- CLOUD, P. (1973): «Paleoecological significance of the banded iron formation», en *Economic Geology*, núm. 68, pp. 1135-1143.
- (1976): «Beginnings of biospheric evolution and their biochemical consequences», en *Paleobiology*, núm. 2, pp. 351-387.
- (1981): *El cosmos, la Tierra y el hombre*. Barcelona, Alianza.
- CLOUD, P., y A. GIBOR (1970): «The oxygen cycle», en *Scientific American*, núm. 223, (3), pp. 110-123.
- COLINVAUX, P. (1983): *Por qué son escasas las fieras. Una introducción a la ecología*. Madrid. H. Blume.
- (1986): *Ecology*. Nueva York, John Wiley & Sons.
- CONNEL, J. H. (1978): «Diversity in tropical rain forest and coral reefs», en *Science*, núm. 199, pp. 1302-1310.

- COVEY, C. (1987): «Protracted climatic effects of massive smoke injection into the atmosphere», en *Nature*, núm. 325. pp. 701-703.
- COX, C. B., y P. D. MOORE (1980): *Biogeography: an ecological and evolutionary approach*. Oxford, Basil Blackwell.
- CRESPO, M., X. FERRER, M. CHINCHILLA y A. SOSTOA (1983): *Introducción a l'ecologia*. Barcelona. Danone.
- CRUTZEN, P. J., y F. ARNOLD (1986): «Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: a major cause for the springtime "ozone hole"», en *Nature*, núm. 324. pp. 651-655.
- CHAISSON, E. (1986): *El amanecer cósmico*. Barcelona. Salvat.
- CHOMSKY, N. (1971): *El lenguaje y el entendimiento*. Barcelona, Seix Barral.
- DAVIS, J. A. (1972): *New York Zoological Society*. Nueva York. The Zoological Park.
- DE CANDOLLE, A. P. A. (1874): *Constitution dans le règne végétal dégroupes physiologiques applicables á la géographie ancienne et moderne*. Ginebra, Archives de Sciences Physiques et Naturelles.
- DE CANDOLLE, A. P. A., y C. DE CANDOLLE (1824-1873): *Prodromus systematis naturalis regnis vegetabilis* (17 vols.). Paris.
- DEEVET, E. S. (1970): «Mineral Cycles», en *Scientific American*, núm. 223 (3), pp. 148-158.
- DEGENS, E. T., S. KEMPE y A. SPITZY (1984): «Carbon dioxide: a biogeo-chemical portrait», en HUTZINGER. 1984.
- DONHOFFER, S. (1986): «Body size and metabolic rate: exponent and coefficient of the allometric equation. The role of units», en *Journal of Theoretical Biology*, núm. 119. pp. 125-137.
- DOWDESWELL, W. H. (1984): *Ecology: principles and practice*. Londres, Heinemann.
- DUVIGNEAUD, P. (1978): *La síntesis ecológica*. Madrid, Alhambra.
- EDMONDS, R. L. (1979): *Aerobiology*. Filadelfia, Dowden. Hutchinson & Ross.
- EDMONDS, W. T., y J. T. LEHMAN (1981): «The effect of changes in the nutrient income on the condition of lake Washington», en *Limnology and Oceanography*, núm. 26. pp. 1-29.
- EDWARDS, G., y D. WALKER (1983): *C₃ C₄ mechanisms, and cellular and environmental regulation of photosynthesis*. Oxford. Basil Blackwell.
- EHRlich, P. R., A. H. EHRlich y J. P. HOLDREN (1977): *Ecoscience: population resources, environment*. San Francisco, Freeman.

- EINSTEIN, A. (1984): *Mi visión del mundo*. Barcelona, Tusquets.
- ELKIN, I. I. (ed.) (1961): *A course in epidemiology*. Nueva York, Pergamon Press.
- EMLEN, J. M. (1984): *Population biology: the coevolution of population dynamics and behavior*. Nueva York, Macmillan.
- EMMEL, C. E. (1977): *Global perspectives on ecology*. Palo Alto, Mayfield.
- FIENNES, R. T. W. (1978): *The environment of man*. Londres, Croom Helm.
- FLEAGLE y BUSINGER (1963): *Introduction to atmospheric physics*. Nueva York, Academic Press.
- FLOS, J. (1977): *Quatre coses d'ecologia*. Barcelona, Caixa de Pensions.
- (1984): *Ecología. Entre la magia y el tópico*. Barcelona, Omega.
- FLOS, J., et al. (1985): *L'oceanografia. Introducció a l'ecologia marina mediterrània*. Barcelona, Diputació de Barcelona.
- FOLCH, R. (ed.) (1976): *Natura, ús o abús? Llibre blanc de la gestió de la natura als Països Catalans*. Barcelona, Barcino.
- FOLCH, R. (1978): *Sobre ecologismo y ecología aplicada*. Barcelona, Ketres.
- FRAKES, L. A. (1979): *Climates throughout geologic time*. Amsterdam, Elsevier.
- FRIEDLI, H., H. LÖTSCHER, H. OESCHGER, U. SIEGENTHALER y B. STAUFFER (1986): «Ice core record of the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 in the past two centuries», en *Nature*, núm. 324. pp. 237-238.
- GATES, D. M. (1968): «Energy exchange between organisms and environment», en *Australian Journal of Science*, núm. 31. pp. 67-74.
- GATES, L. (1979): «The physical basis of climate», en *Proceedings of World Climate Conference, WMO*, núm. 537, p. 114.
- GATES, D. M., y R. B. SCHMERL (eds.) (1975): *Perspectives in biophysical ecology*. Berlin, Springer.
- GLOTFELTY, D. E., J. N. SEIBER y L. A. LIUEDAHL (1987): «Pesticides in fog», en *Nature*, núm. 325, pp. 602-605.
- GONZÁLEZ CABRE, J. M. (1978): *La contaminació*. Barcelona, Diputació de Barcelona.
- GORHAM, E., J. UNDERWOOD, F. B. MARTÍN y J. G. OGDEN (1986): «Natural and anthropogenic causes of lake acidification in Nova Scotia», en *Nature*, núm. 324. pp. 451-453.

- GOULD, S. J. (1980): *The panda's thumb*. Nueva York, Norton.
- (1984): *Hen's teeth and horse's toes*. Nueva York, Norton.
- GREEL, H. G. (1976): *El pensamiento chino desde Confucio hasta Mao Tse Tung*. Madrid, Alianza.
- GREEN, M. B. (1984): *Los plaguicidas: ¿beneficiosos o perjudiciales?* León. Academia.
- GRIBBIN, J. (1981): *Future worlds*. Nueva York, Plenum Press.
- (1986): *El clima futuro*, Barcelona. Salvat.
- GRIBBIN, J. (ed.) (1986): *The breathing planet*. Oxford. Basil Blacwell.
- GRIME, J. P. (1979): *Plant strategies and vegetation processes*. Nueva York, John Wiley & Sons.
- HALL, C. A. S. (1977): «The biosphere, the industriosphere and their interactions», en EMMEL 1977.
- HANSEN, J. A., *et al.* (1981): «Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide», en *Science*, núm. 312-, p. 961.
- HARVEY, J. G. (1976): *Atmosphere and ocean: our fluid environments*. Sedgwick Park, The Artemis Press.
- HAYES, D. (1977): *Rays of hope. The transition to a postpetroleum world*. Nueva York, Norton.
- HOBBS, T. (1651): *Leviathan, or the matter, form and power of a commonwealth, ecclesiastical and civil* (Ed. H. W. Schneider), Indianapolis, Boobs-Merril, 1958.
- HOKKANEN, J. E. I. (1986): «The size of the largest animal», en *J. Theor. Biol.*, núm. 118. pp. 491-499.
- HOLDSWORTH, G. (1986): «Evidence for a link between atmospheric thermonuclear detonations and nitric acid», en *Nature*. núm. 324, pp. 551-553.
- HOLLAND, H. D. (1984): «The chemical evolution of the atmosphere and oceans», en *Nature* núm. 320, pp. 27-33.
- HOLLAND, H. D., y M. Me CAFFREY (1986): «Evolution of the atmosphere and oceans», en *Nature*, núm. 320, pp. 27-33.
- HORN, H. S. (1971): *The adaptative geometry of trees*. Princeton. Princeton University Press.
- HORNE, R. A. (1978): *The chemistry of our environment*. Nueva York, John Wiley & Sons.
- HUTCHINSON, G. E. (1949): «Circular causal systems in ecology», en *Annals of the New York Academy of Sciences*, núm. 51. pp. 221-246.

- (1957.1967.1976): *A treatise on limnology, I(1, 2). Geography, physics, chemistry. II. Lake biology and lim no plankton. III. Limnological botany.* Nueva York, John Wiley & Sons.
- HUTZINGER, O. (ed.) (1980. 1982. 1984, 1985): *The handbook of environmental chemistry. I. The natural environment and the biogeochemical cycles. A, B. C, D. 2. Reactions and processes. A, B. C. 3. Anthropogenic compounds. A, B. C.* Berlin. Springer.
- JABLONSKI, D. «Background and mass extinctions: the alternation of macroevolutionary regimes», en *Science*, núm. 231, pp. 129-133.
- JOU. D. (1985): *Introducció a la termodinàmica de processos biològics.* Barcelona. Institut d'Estudis Catalans.
- CASTING. J. F., y T. P. ACKERMAN (1987): «Climatic consequences of very high carbon dioxide levels in the Earth's early atmosphere», en *Science*, num. 234. pp. 1383-1385.
- KEELEY. J. E., C. BARRY OSMOND y J. A. RAVEN (1984): «Stulites, a vascular land plant without stomata absorbs CO₂ via its roots», en *Nature*. num. 310, pp. 694-695.
- KERFOOT. W. C. (ed.) (1980): *Evolution and ecology of zooplankton communities.* Hanover. University Press of New England.
- KFTTLEWELL. H. B. D. (1958): «A survey of the frequencies of *Biston betularia* and its melanistic forms in Great Britain», en *Heredity*, num. 12. pp. 51-72.
- KORMONDY, E. J. (1969): *Concepts of ecology.* Nueva York. Prentice & Hall.
- KORMONDY. E. J. (ed.) (1965): *Readings in ecology.* Englewood Cliffs, Prentice & Hall.
- LAL. P. (1965): *The Bhagavadgita.* Nueva Delhi, Orient.
- LAMARCHE, V. C. D. A. GRAYVILLE, H. C. FRITTS y M. R. ROSE (1984): «Increasing atmospheric carbon dioxide: tree-ring evidence for growth enhancement in natural vegetation», en *Science*, núm. 225, pp. 1019- 1021.
- LAMB, H. H. (1972): *Climate: present past and future.* Vol. 1. Londres. Methuen.
- LANGMUIR, I. (1938): «Surface motion of water induced by wind», en *Science*, num. 87, pp. 119-123.
- LANSBERG, J. E. (1962): «City air — better or worse. Air cover cities», en *U. S. Public Health Service Technical Report*, núm. A 62-5, p. 122.

- LEBRETON, P. (1970): *Eco-logique. Initiation aux disciplines de Ten-vi-ron-ment*. París, Interéditions.
- LINDEMAN, R. L. (1942): «The trophic dynamic aspects of ecology», en *Ecol.*, núm. 23. pp. 399-418.
- LOVELOCK, J. E. (1983): *Gaia. Una nueva visión de la vida sobre la Tierra*. Madrid. H. Blume.
- LOWE, G., M. MEISTER y H. C. BERG (1987): «Rapid rotation of flagellar ^ fundles in swimming bacterio», en *Nature*, núm. 325. pp. 637-640.
- LURIA. S. E. (1975): *La vida. experimenuFinacabado*. Madrid. Alianza.
- MACARTHUR. R. H. (1972): *Geographical ecology. Patterns in the distribution of species*. Nueva York. Harper & Row.
- MACARTHUR. R. H., y J. H. CONNELL (1966): *The biology of popula-tion*. Nueva York. John Wilev & Sons.
- MACARTHUR, R. H., y E. O. WILSON (1983): *Teoría de la biogeogra-fía insular*. Palma de Mallorca. Moll.
- MACFARLANE, F. (1973): *El mamífero dominante*. Madrid. Alianza.
- MACLULICK. D. A. (1937): «Fluctuacions in the numbers of the varyn-ghare (*Lepus americanas*)», en *University of Toronto Studies on Biology Series*, núm. 43, pp. 1-136.
- MALTHUS, T. R. (1966): *Primer ensayo sobre la población*. Madrid. Alianza.
- MARGALEF, R. (1958): «Information theory in ecology», en *General Systems*, núm. 111. pp. 36-71.
- (1963): «On certain unifying principles in ecology», en *Amer. Na-tur.*, núm. 97. p. 374.
- (1974): *Ecología*. Barcelona. Omega.
- (1978): *Perspectivas de la teoría ecológica*. Barcelona. Blume.
- (1979): «The organization of the space», en *Oikos*, núm. 33, pp. 152- 159.
- (1980): *La biosfera, entre la termodinámica y el juego*. Barcelona, Omega.
- (1981): *Ecología*. Barcelona, Planeta.
- (1985): *L'ecologia*. Barcelona, Diputado de Barcelona.
- (1987): *The biosphere in the making*. Chicago, Chicago Press (en prensa).
- MARGITAN, J. J. (1987): «Antarctic ozone. Causes and effects of a hole», en *Nature*, núm. 325, pp. 297-298.

- MARCULIS, L. J., C. G. WALKER y M. RAMBLER (1976): «Reassessment of roles of oxygen and ultraviolet light in precambrian evolution», en *Nature*, núm. 264, pp. 620-624.
- MARGULIS, L., y D. SAGAN (1986): *Origins of sex: three billion years of genetic recombination*. New Haven, Yale University Press.
- MARTÍN VIDE, J. (1984): *Interpretación de los mapas del tiempo*. Barcelona, Ketres.
- MONOD, J. (1970): *El azar y la necesidad*. Barcelona. Orbis.
- MOORE, P. D. (1986): «Toxins and grazing resistance», en *Nature*, núm. 324, p. 410.
- MORAN, J. M., M. D. MORGAN y J. H. WIERSMA (1980): *Introduction to environmental science*. San Francisco. Freeman.
- MOROWITZ, H. J. (1978): *Entropía para biólogos. Introducción a la termodinámica biológica*. Madrid, H. Blume.
- MOOS, B. (1980): *Ecology of the freshwaters*. Oxford. Basil Blackwell.
- MURILLO, J., L. RECASENS y J. PEÑUELAS (1986): «Influencia de los factores ambientales en las pautas de emergencia y vuelo de *Sigara lateralis*», en *Actas de las III Jornadas Españolas de Entomología* (Sevilla), pp. 373-381.
- (1987): «Comportamiento predatorio de *Notonecta macúlala*», en *Actas del IV Congreso Español de Limnología* (Sevilla), pp. 427-433.
- NEWELL, N. D. (1963): «Crisis in the history of life», en *Scientific American*, núm. 208, pp. 77-92.
- NORMAN, C. (1987): «United States floats proposal to help prevent global ozone depletion», en *Science*, núm. 234, pp. 927-929.
- ODUM, H. T. (1980): *Ambiente, energía y sociedad*. Barcelona. Blume.
- ODUM, E. P. (1983): *Basic ecology*. Filadelfia. Saunders.
- OPHULS, W. (1977): *Ecology and the politics of scarcity*. San Francisco. Freeman.
- PASTEUR, G. (1982): «A classificatory review of mimicry systems», en *Annual Review of Ecology and Systematics*, núm. 13, pp. 163-199.
- PENNER, J. E. (1986): «Uncertainties in the smoke source term “nuclear winter” studies», en *Nature*, núm. 324, pp. 222-226.
- PEÑUELAS, J. (1982): *Cultiu de microalgues a l'aire lliure*. Barcelona. Arxius de l'Escola d'Agricultura de Barcelona (inédito).

- (1984 a): «Pigment and morphological response to emersion and immersion of some aquatic and terrestrial mosses in N.E. Spain», en *Journal of Bryology*, núm. 13. pp. 115-128.
- (1984 b): «Pigments of aquatic mosses of the river Muga (N. E. Spain) and their response to water pollution», en *Lindbergia*, núm. 10. pp. 127-132.
- (1984 c): «Bicarbonate as an exogenous carbon source for the aquatic bryophytes *Fontinalis antipyretica* and *Fissidens grandifrons*», en *Journal of Experimental Botany*, núm. 36 (164), pp. 441-448.
- (1985): *Briófitos i fanerogames com a invasors de les aigües dolces* (tesis doctoral).
- (1987 a): «High oxygen tension avoids the growth of higher plants in deep water», en *Photosynthetica*. núm. 21 (4). pp. 494-502.
- (1987b): «La brioflora lacustre. Algunos datos de los lagos pirenaicos». en *J. cn ^nalesjlel Jardín Botánico de Madrid* núm' 44 (TTPp- 3í-39~~)
- (1988): «Effects of hydrostatic pressure and irradiance on aquatic plants», en *Polish Archive of Hydrobiology*, núm. 35 (1), pp. 17-32.
- PEÑUELAS, J., y J. CATALÁN (1983): «Distribution longitudinale des bryophytes aquatiques d'un fleuve méditerranéen du N.E. de l'Espagne: le Fluviá», en *Annals de Limnologie*, núm. 19 (3), pp. 179-185.
- PEÑUELAS, J., y M. COMELLES (1984): «Contribución al estudio de los briófitos acuáticos de lagunas y charcas de España», en *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, núm. 40 (2). pp. 325-334.
- PEÑUELAS, J., y F. SABATER (1987): «Distribution of macrophytes in relation to physico-chemical parameters in the Ter river (N. E. Spain)», en *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie*, núm. 72 (1). pp. 41-58.
- PEÑUELAS, J., y C. FIELD (1988): «Photosynthetic responses of leaves of *Piper hispidum* and *Piper auritum* to shift from shaded to sunny environment. Role of oxygen in photoinhibition», en *Oecologia* (en prensa).
- PEÑUELAS, J., J. MURILLO y J. AZCÓN-BIETO (1988): «Actual and potential dark respiration rates and different electron transport pathways in fresh water aquatic plants», en *Aquatic Botany* (en prensa).
- PIELOU, E. C. (1969): *An introduction to mathematical ecology*. Nueva York. John Wiley & Sons.
- (1985): *Ecological diversity*. Nueva York, John Wiley & Sons.

- PRAT, N., y M. A. PUIG (1982): *El riu pam a pam*. Barcelona, Diputado de Barcelona.
- PRENTIS, S. (1986): *Biotecnología*. Barcelona, Salvat.
- PRICE, P. W. (1975): *Insect ecology*. Nueva York. John Wiley & Sons.
- PROTHERO, J. (1986): «Methodological aspects of scaling in biology», en *Journal of Theoretical Biology*, núm. 118, pp. 259-286.
- PUIG, M. A., J. ARMENGOL, G. GONZÁLEZ, J. PEÑUELAS, S. SABATER y F. SABATER (1987): «Effect of reservoirs on water quality of the river Ter», en *Regulated streams: advances in ecology*. Nueva York. Plenum Press.
- RAUP, D. M. (1986): «Biological extinction in earth story», en *Science*. núm. 231, pp. 1528-1533.
- REICH, P. B., y R. G. AMUNSON (1985): «Ambient levels of ozone reduce net photosynthesis in tree., crop species», en *Science*, núm. 230. pp. 566-570.
- RICKLEFS, R. E. (1973): *Ecology*. Nueva York. Chiron Press.
- RIERA, T., M. ZABALA y J. PEÑUELAS (1988): «Mysids from submarine caves go to feed out every night», en *Marine Biology* (en prensa).
- RIFKIN, J. (1980): *Entropy: a new world view*. Nueva York. Viking Press.
- ROSTAND, J. (1970): *El correo de un biólogo*. Madrid. Alianza.
- SABATER, F. (1987): *Estudi ecològic del riu Ter* (Tesis doctoral). Barcelona. Universidad de Barcelona.
- SABATER, F., y J. PEÑUELAS (1986): «Composting in Catalonia. Spain», en *Biocycle*, núm. 27 (7), pp. 52-54.
- SCHIDLOWSKI, M. (1983): «Evolution of photoautotrophy and early atmospheric oxygen levels», en *Precambrian Research*, núm. 20, pp. 319-335.
- SCHMIDT-NIELSEN, K. (1976 a): *Fisiología animal. Adaptación al medio ambiente*. Barcelona, Omega.
- (1976 b): *Cómo funcionan los animales*. Barcelona, Omega.
- SCHNEIDER, S., y R. LONDER (1984): *The coevolution of climate and life*. San Francisco, Sierra Club Books.
- SCHUMACHER, G. F. (1973): *Small is beautiful*. Nueva York. Harper & Row.
- SCIENTIFIC AMERICAN (1969): *The ocean*. San Francisco, Freeman.
- (1972): *La biosfera*. Madrid, Alianza.
- (1975 a): *La energía*. Madrid, Alianza.
- (1975 b): *El hombre y la ecosfera*. Madrid, H. Blume.

- (1976 a): *Química y ecosfera*. Madrid, H. Blume.
- (1976 b): *La población humana*. Barcelona, Labor.
- (1978 a): *Deriva continental y tectónica de placas*. Madrid, H. Blume.
- (1978 b): *Oceanografía*. Madrid, H. Blume.
- (1987 c): *Ecología, evolución y biología de poblaciones*. Barcelona, Omega.
- (1979): *Evolución*. Barcelona, Labor.
- SHERRINGTON, C. (1940): *Man on his nature*. Cambridge, Cambridge University Press.
- SIOLI, H. (ed.) (1982): *Ecología y protección de la naturaleza. Conclusiones internacionales*. Barcelona, Blume.
- SMITH, J. M. (1984J): «Are we stuck with sex?», en *Nature*, num. 325, pp. 307-308. r
- STABLEFORD, B. (1984): *Future man. Brave new world or genetic nightmare?* Crown Publishers.
- STOCKER, H. S., y S. L. SEAGER (1981): *Química ambiental: contaminación del aire y del agua*. Barcelona, Blume.
- STUIVER, M. (1978); «Atmospheric carbon dioxide and carbon reservoir changes», en *Science*, num. 199, pp. 253-258.
- SUTCLIFFE, J. (1977): *Las plantas y el agua*. Barcelona, Omega.
- TERRADAS, J. (1971): *Ecología d'avui*. Barcelona, Teide.
- TOWE, K. M. (1978): «Early Precambrian oxygen: a case against photosynthesis», en *Nature*, num. 274, pp. 657-661.
- TUSÓN, J. (1987): *Lingüística. Una introducción al estudio del lenguaje, con textos comentados y ejercicios*. Barcelona, Barcanova.
- VALLENTYNE, J. R. (1978): *Introducción a la limnología. Los lagos y el hombre*. Barcelona, Omega.
- VASILIEV, M., y S. GUSCHEV (1971): *Reportajes desde el siglo XXI*. Madrid, Alianza.
- WALKER, J. C. G. (1977): *Evolution of the atmosphere*. Nueva York. Macmillan.
- WALLACE, A. R. (1876): *The geographic distribution of animals* (2 vols.). Londres. Macmillan.
- WALTER, H. (1973): *Vegetation of the Earth in relation to climate and ecophysiological conditions*. Londres, English University Press.
- WEGENER, A. (1966): *The origin of continents and oceans*. Nueva York. Dover.
- WETZEL, R. G. (1975): *Limnology*. Filadelfia, Saunders.

- WHITTAKER. R. H. (1970): *Communities and ecosystems*. Nueva York, Macmillan.
- (1977): «Evolution of species diversity in land communities», en *Evolutionary Biology*, núm. 10, pp. 1-67.
- WHITTAKER, R. H. (ed.) (1978): *Classification of plant communities*. La Haya, Junk.
- WHILLIAMS, G. C. (1975): *Sex and evolution*. Princeton, Princeton University Press.
- WINSON, J. (1986): *Cerebro y psique*. Barcelona, Salvat.
- WOODWELL, G. M., *et al.* (1978): «The biota and the world carbon budget», en *Science*, num. 199. pp. 141-146.
- ZARET. T. M., y J. S. SUFFERN (1976): «Vertical migration in zooplankton as a predator avoidance mechanism», en *Limnology and Oceanography*, núm. 21, pp. 804-813.



Nuestra vida no sólo está íntimamente relacionada con la de los demás organismos del planeta, sino que en último término depende de ellos. La ecología, es decir, el estudio de las relaciones entre los seres vivos y su entorno, no puede ser por consiguiente una ciencia reservada a unos pocos expertos, pues sus hallazgos y conclusiones nos conciernen a todos. Este libro es una introducción a los principales temas de la ecología, destinada a todas aquellas personas sensibles al papel del ser humano en nuestro planeta.

Josep Peñuelas es especialista en fisiología ecológica e investigador del Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentària de la Generalitat de Catalunya. En su faceta de divulgador, ha publicado numerosos artículos y varios libros sobre temas ecológicos.