

EL SISTEMA NATURAL TERRESTRE

Por Jean L. F. Tricart*

A partir de la mitad del siglo pasado, el desarrollo del pensamiento científico se caracteriza por una especialización que ha crecido muy rápidamente, perjudicando las visiones de conjunto, tales como aquellas de HUMBOLDT. Se torna cada vez más difícil ubicar en su marco tal o cual descubrimiento. Ora bien, el Hombre necesita visiones de conjunto, principalmente para el manejo de su ambiente geográfico y para lograr un mejor uso de recursos que se tornan rápidamente escasos frente al crecimiento demográfico. Un ejemplo: el Perú, país de ambientes ecológicos muy variados, era, treinta años atrás, un exportador neto de productos agropecuarios. Ahora, 30% de las calorías consumidas por su población son importadas. El cabal uso de los recursos naturales y su manejo racional requieren más que estudios pormenorizados y desmembrados: una visión de conjunto que analice las interacciones entre los diversos componentes del medio natural. Nos hace falta poder prever las consecuencias, a veces muu indirectas, de tal o cual medida, consecuencias que pueden ser muy negativas, cuando, a primera vista, aquella medida aparece aconsejable.

Las ciencias naturales, después de haber enfocado principalmente la sistemática se encaminaron a la biología. En 1934 y 1936, cincuenta años atrás, el inglés TANSLEY ha sistematizado las ideas de la época y propuesto a los científicos el concepto de **ecosistema**. Este concepto enfoca las relaciones mutuas entre los diversos seres vivos y entre ellos y su ambiente. Desgraciadamente, por su formación especializada, los naturalistas han investigado mucho más las relaciones entre los seres vivos que las relaciones de estos seres con su ambiente (cadenas alimenticias, fitosociología que ciertos investigadores quieren considerar como la propia ecología). Bajo la influencia de los requerimientos de programas de ordenamiento agrícola, principal-

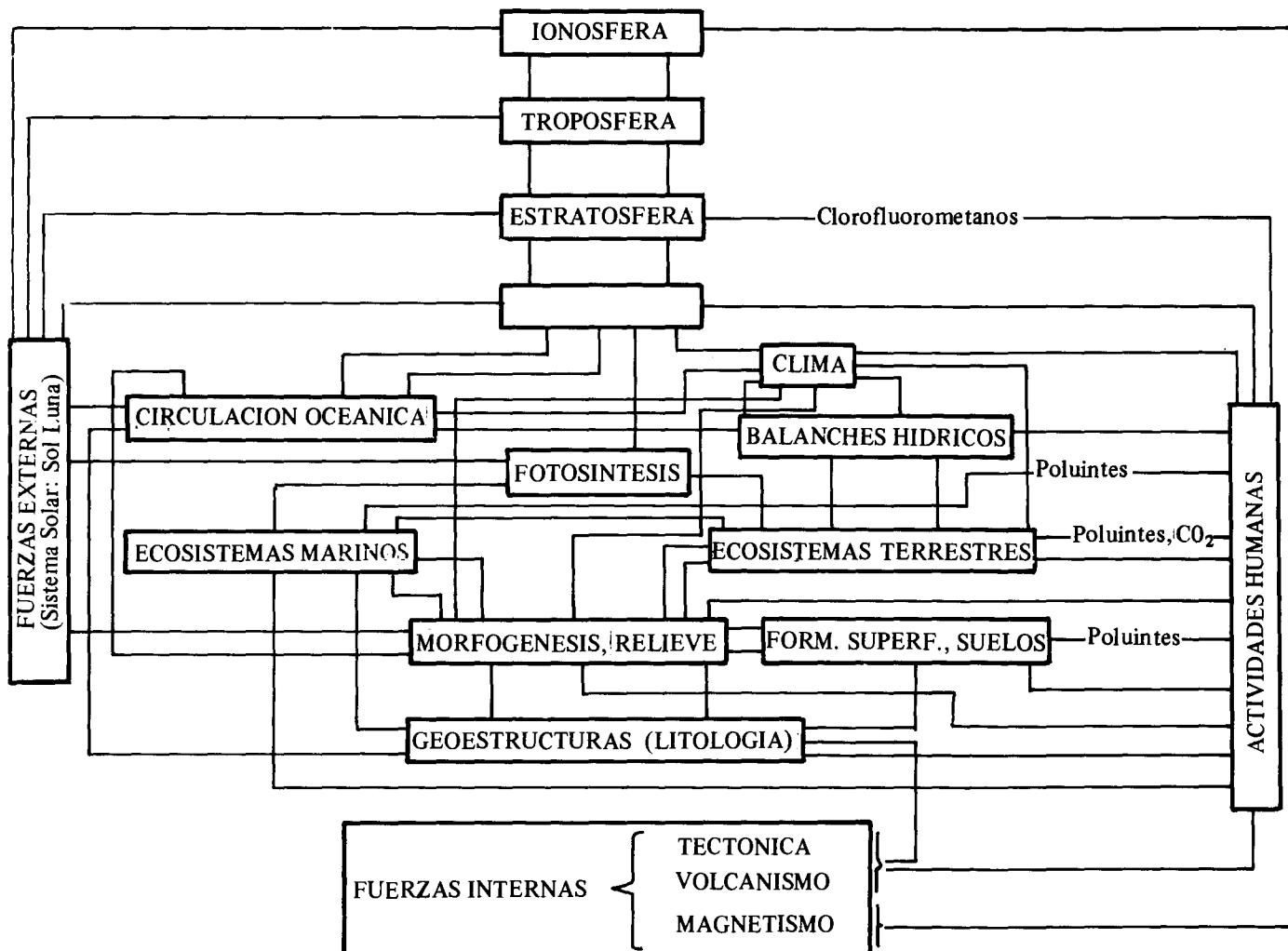
mente en Africa Occidental, en Venezuela, en Argentina, he tenido que dedicar mucha atención al estudio del ambiente ecológico no sólo sus características actuales, sino su evolución durante el pasado y las herencias dejadas por ella y contradictorias con las condiciones actuales. Es el fruto de aquella experiencia y de su profundización metodológica que quisiera dedicar a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, como homenaje por el gran honor que ella me ha concedido, escogiéndome como miembro extranjero suyo.

1. LOS TRES POLOS DEL SISTEMA NATURAL TERRESTRE

Desde el origen, cuando se individualizaron los planetas, cada uno de ellos, incluyendo la tierra, era sometido a la interferencia dialéctica de dos grandes conjuntos de fuerzas: las fuerzas externas, es decir de aquellas fuerzas radicadas al exterior del planeta, y las fuerzas internas, que actúan dentro del planeta mismo. Esta situación se ha tornado más compleja durante los últimos tiempos, unos pocos milenios, en contraste con la individualización de la Tierra que se ha realizado hace alrededor de 4.600.000.000 de años. Este hecho nuevo es el desarrollo tecnológico del Hombre. Sus primeros brotes ocurrieron durante el Neolítico cuando la agricultura y la caza empezaron a desempeñarse. Las primeras variedades cultivadas de maíz (*Zea*) aparecieron en México hace algunos 7.000 años. Este tiempo es apenas la 1/657.000^o parte de la vida de nuestra Tierra. Pero, la característica del desarrollo tecnológico es su aceleración de tipo exponencial, tipo este que caracteriza también al desarrollo de la Vida sobre nuestro Globo (crecimiento de la cantidad de especies, y, probablemente, también de individuos). A pesar de su reciente aparición, este tercer polo ya ha ganado una importancia de ninguna forma despreciable.

Sobre el organigrama, he dispuesto cada uno de los tres polos en lados diferentes. Hubiera sido más

* Centre de Géographie Appliquée. Université Louis-Pasteur, Strasbourg.



lógico dibujar el conjunto en forma de triángulo, pero habrían surgido complicaciones materiales. La disposición rectangular se adoptó por mayor comodidad.

Las **FUERZAS EXTERNAS** consisten de dos elementos muy desiguales:

—La **radiación solar**, cuyo papel es muy predominante. Dicha radiación suministra la energía que permite el desarrollo de la vida sobre la Tierra, por intermedio del proceso de la fotosíntesis. Las plantas elaboran, con aquella energía, tejidos que consisten de carbono hidratado a partir del agua y de los minerales de los suelos. Se llaman productores primarios por esta razón. Otras plantas y, sobre todo, los animales, entre ellos el Hombre, son incapaces de fotosintetizar y, por lo tanto deben sustentarse con las células de las plantas. La planta, productor primario, es el punto de partida de la cadena alimentaria, otra expresión equivalente, la base de la pirámide trófica. Todas las flechas del organigrama que salen de la “caja negra” “fuerzas externas” y que llegan a “ionosfera”, “troposfera”, “estratosfera”, “atmósfera” y “fotosíntesis” materializan flujos de la energía radiante

del Sol. En la ionosfera llegan las partículas del “viento solar”, corpúsculos con una energía enorme y, por eso, muy peligrosos para los tejidos celulares, que ellos pueden destruir. El impacto de aquellos corpúsculos con las moléculas de los gases atmosféricos, muy diluidas en el espacio, produce isótopos, entre los cuales ^{18}O y ^{14}C son los más conocidos por aprovecharse para calcular edades y/o temperaturas. Sólo una pequeña parte del flujo de corpúsculos generado por el sol llega hasta la parte externa extrema de la atmósfera terrestre. Los desvían los anillos de Van Allen, producidos por el magnetismo terrestre, expresado gráficamente por la flecha que sale a la derecha de la parte baja del rectángulo “Fuerzas Internas” para llegar a “ionósfera”.

El resto de la radiación solar, la componen integrantes del espectro electromagnético, es decir ondas de diferentes longitudes (o frecuencias): el infrarrojo térmico, que transmite calor y calienta la atmósfera, el “visible”, es decir la luz, aprovechada por la fotosíntesis; el ultravioleta, por fin, cuyas ondas son más cortas que aquellas del visible y que son, además, peligrosas para los tejidos

que queman. El ozono, en la estratosfera impide el paso de la mayor parte del UV hacia abajo, hacia la superficie terrestre.

—La otra forma de energía suministrada por el sistema solar es la fuerza de atracción, proporcionada con la masa del cuerpo e inversa de la distancia. El Sol, enorme pero muy alejado, no ejerce una atracción sobre la Tierra que sobrepase en mucho aquella de la Luna, muy pequeña en proporción, pero mucho más cercana. Ambas atracciones se combinan para mover el agua en forma de mareas. Este fenómeno participa en la formación del relieve litoral. Por lo tanto, se ha dibujado una flecha que sale de “Fuerzas Externas” y llega a “Morfogénesis, Relieve”. Es claro que la influencia morfogenética de las mareas es poca cosa frente a las manifestaciones de la radiación solar... Por otra parte, la atracción cósmica no se limita al agua, afecta también la corteza terrestre a la cual imprime pequeñas deformaciones conocidas bajo el nombre de “mareas terrestres”. Se trata también de un pormenor frente a la actividad radiante del Sol. Por fin, para satisfacer un escrúpulo de precisión, debemos incluir las caídas de meteoritos, incluyendo cometas, sobre nuestro globo. En los primeros tiempos de su existencia, han desempeñado un papel importante en la formación de la corteza terrestre (acreción) y de la atmósfera (C de las condritas, H₂O de los cometas). El bombardeo ha disminuido drásticamente desde estos tiempos, sin embargo, de vez en cuando un impacto de meteorito participa en la elaboración del relieve terrestre bajo la forma de un astroblema. Si hubiera caído el meteorito de la Tunguska (1910) en un área más densamente poblada, el impacto hubiera desencadenado una catástrofe trágica. Algunos científicos atribuyen a la caída de un meteorito grande la extinción de los Dinosaurios al finalizar el del Cretáceo (65.000.000 de años).

Las FUERZAS INTERNAS tienen su raíz en la energía constituida por la materia que forma el Globo Terrestre. Aquella materia ha empezado luego durante el Proterozoico un proceso de diferenciación y, a menudo, una evolución que consiste en una reorganización molecular, produciendo calor. Estos mecanismos han generado el magnetismo, la evolución tectónica del Globo y el volcanismo, estrechamente vinculado con ella.

—El magnetismo sería una consecuencia de la diferenciación de la parte sólida de la Tierra en un núcleo, un manto y una corteza, posiblemente desde hace ya 3.000.000.000 de años. La teoría comúnmente aceptada por los geofísicos admite un Núcleo de densidad más elevada que el Manto, de tal forma que la rotación de la Tierra alrededor del eje polar provoca diferencias de velocidad angular entre ambos. La disposición se asemeja a aquella de una dinamo, produciendo el campo magnético terrestre. Obviamente se produce una pérdida de energía por fricción, cuya consecuencia sería una disminución paulatina de la velocidad de rotación de la Tierra, traduciéndose por un alargamiento de los días y noches al transcurrir los tiempos geológi-

cos. Ya hemos señalado el efecto del magnetismo terrestre, con los anillos de Van Allen y la protección por ellos brindada contra el viento solar. Los cambios de posición respectiva de los Polos Magnéticos con el tiempo han sido lo suficientemente numerosos y marcados para suministrar un registro cronológico (*Epocas*, cada una con una posición de los polos sea del tipo actual llamada “normal” o contraria, llamada “inversa”, y *Acontecimientos*, de duración más reducida). El paleomagnetismo nos brinda una cronología, que ha sido ajustada con la sucesión paleontológica tradicional y las geocronologías isotópicas. Por otra parte, el paso de un polo magnético al otro hemisferio (inversión del campo magnético), ha provocado necesariamente una anulación del campo magnético. Ignoramos por completo, la fecha y cuál ha podido ser la duración de tales anulaciones: ¿segundos, años, siglos, milenios? Es probable que estas duraciones han sido bastante diversas. Pero, algunas de ellas, de duración suficiente, han provocado una interrupción de la protección de la superficie terrestre contra el viento solar. Ciertos autores norteamericanos atribuyen a ellas la desaparición de especies de microorganismos marinos (Foraminíferos, Diatomeas, etc...), y/o mutaciones bruscas. A la fecha sólo se han podido establecer coincidencias... pero el problema es digno de llamar la atención. Podría incluirse en el organigrama dibujando flechas que ligen “magnetismo” a “ecosistemas”, tanto “marinos” como “terrestres”.

—Tectónica y volcanismo están íntimamente ligados entre sí. Ambos provienen de la diferenciación de la materia del globo terrestre en una corteza superior y otra inferior. A. WEGENER, el bien conocido geofísico austriaco ha propuesto, ya hace 2/3 de siglo, una hipótesis según la cual los continentes, formados de Sial, flotaban sobre una capa de Sima y se desplazaban alrededor del Globo, África habiéndose separado de América del Sur y el Gondwana habiéndose partido en pedazos originó: India Peninsular, Australia, Antártida, Escudo Brasileño. La idea se ha modernizado bajo la forma de la teoría de placas. Las placas continentales, las forman rocas granitoides, rígidas. En el fondo de los océanos, yacen rocas basálticas que se derraman sobre el piso marino por las aberturas de los “rifts” medio-oceánicos. Las dataciones por el paleomagnetismo constituyen el más fuerte argumento en favor de la tectónica de placas: los basaltos derramados de ambos lados de los rifts son de edad cada vez más antigua cuanto más lejos se ubican del eje del “fift”. Cuando una placa colida con otra y la recubre, se produce una subducción. El fenómeno funciona desde Alaska hasta Tierra del Fuego, diversas placas del lado americano cabalgan sobre placas del Pacífico las cuales se hundén, por subducción, debajo de ellas. A lo largo de los cinturones de subducción, se ubican zonas de alta sismicidad profunda (alrededor de 80 Km) y alineamientos de volcanes activos (“Cintura de Fuego del Pacífico”). Tectónica y volcanismo están íntimamente ligados entre sí. Su asociación determina las geoestructuras, ca-

racterizadas no solamente por los movimientos de la corteza y sus deformaciones sucesivas, sino más bien por los tipos de rocas que las constituyen (cratones granitogneisicos, geosinclinales, plataformas con sedimentos de débil profundidad, acumulaciones volcánicas de diversos tipos): por eso, en la misma caja negra he asociado "Geoestructuras (Litología)". Una flecha indica que se trata de un producto de las Fuerzas Internas.

Las **ACTIVIDADES HUMANAS** son parte de otro sistema, el sistema humano, cultural, social y económico. Consideraré sólo una parte de ello, la parte tecnológica. El hombre no es el único animal que artificialice su ambiente para tornarlo más favorable a su existencia. Ciertos insectos, todos con organización social, lo hacen también: las termitas han acondicionado el aire mucho antes del Hombre, para criar sus descendientes y, en muchos casos, cultivar levaduras y hongos microscópicos para su alimentación. Las avispas edifican también sus nidos. Entre los mamíferos, los castores realizan obras hidráulicas, con represas y control del nivel del agua como sistema de defensa de sus viviendas. Pero el hombre va mucho más allá en materia de artificialización, en parte tan lejos que es inconsciente de las consecuencias que puede desencadenar. Las relaciones del Hombre con el ambiente natural son de dos tipos, uno y otro pintado con flechas de dirección contraria. Las flechas que se dirigen desde una cajita cualquiera hasta el rectángulo "Actividades Humanas" especifican una influencia del ambiente natural sobre las actividades del Hombre. Las que se orientan en dirección contraria indican influencias antrópicas sobre el ambiente.

—**Influencias del ambiente sobre las actividades humanas:** incluyen recursos por un lado, limitaciones por el otro:

- La tectónica expone al hombre a los sismos, frecuentemente destructivos. Las erupciones volcánicas provocan también daños y víctimas, pero, a veces, enriquecen el suelo (cenizas que brindan minerales "juveniles", aptos para liberar nutrientes).
- Las geoestructuras y el material que las integran contienen yacimientos de minerales, desde el oro, hasta los hidrocarburos, sin menospreciar el hierro, los materiales de construcción, etc...
- Lo mismo ocurre con las formaciones superficiales, en las cuales se excava frecuentemente para anclar las fundaciones de los edificios, o para edificar vías de comunicación, extraer agua, etc... Los suelos son un elemento clave en todas las actividades agro-silvo-pastorales.
- De los ecosistemas marinos y terrestres, el hombre extrae alimentos y materias primas. Los artificializa, principalmente los terrestres, transformándolos en campos de cultivo, en pastizales, en bosques plantados.
- El relieve suministra numerosas limitaciones a las actividades humanas: Colombia, con sus sierras,

sus fuertes desnivelaciones, sus pendientes empinadas, ofrece ejemplos muy gráficos de ellas.

- El clima, por fin, es un integrante del ambiente que debe tomarse en consideración para la vivienda, para los vestidos, para la organización de la vida y, naturalmente, para toda actividad productiva rural.

—Las alteraciones ambientales provocadas por las actividades humanas no tienen menos importancia. Empiezan ellas desde luego en el nivel más alto de la atmósfera y actúan hasta sobre los procesos morfológicos.

- En la estratosfera, llegan las moléculas de clorofluorometanos, principalmente los productos usados para la fabricación de "bombas", insecticidas, desodorizantes, etc... Estas moléculas se combinan con el ozono y lo destruyen, eliminando paulatinamente su papel irremplazable de protección contra la peligrosa radiación ultra-violeta.

- En la atmósfera las emisiones de origen antrópico son mucho más abundantes y diversas. El humo y el polvo fino que se lleva el viento desde las superficies desnudadas forman aerosoles que pueden servir de núcleos de condensación, tornando las precipitaciones más intensas y violentas. Varios cuerpos químicos forman aerosoles, tornando la niebla nociva (el "smog" inglés). Los varios óxidos de nitrógeno (NO_x) emitidos por los coches y ciertas fábricas, son un veneno. El gas carbónico lo generan también, las fábricas, los medios de transporte y de calefacción, las plantas térmicas de electricidad. El gas sulfúrico es, también, muy peligroso. Todos estos cuerpos dificultan la penetración de la luz solar a través de la atmósfera, y, por consecuencia, perjudican la fotosíntesis, es decir la producción vegetal (flecha atmósfera → fotosíntesis), además de afectar gravemente la salud pública.

- Modificando la cubierta vegetal y extrayendo agua, el hombre altera los balances hídricos (infiltración del agua lluvia en el suelo, evaporación, transpiración vegetal) y, lógicamente, las reservas de agua disponibles para la vida vegetal en el suelo.

- Por otra parte, echa el hombre toda clase de desperdicios y de basura en el campo y en los ríos. El agua los lleva a veces hasta los acuíferos, que se contaminan. Lo mismo pasa con los suelos y con los ecosistemas tanto terrestres como acuáticos, incluso marinos. Las emisiones de CO_2 cuya concentración atmosférica se incrementó en el 33% desde hace un siglo, afecta el metabolismo de las plantas.

- Por fin, ciertas obras de ingeniería, pero más aún el uso agropecuario de las tierras altera la morfodinámica. Más del 90% del material que llevan los ríos al mar resulta de la destrucción de la cubierta vegetal y de malas prácticas de cultivo y de pastoreo.

Después de enumerar los principales "entrantes" en el sistema natural, vamos a examinar el funcionamiento interno de este sistema.

II. FUNCIONAMIENTO INTERNO DEL SISTEMA NATURAL TERRESTRE

El sistema natural terrestre puede considerarse como la interfase entre la parte sólida del Globo mas sus envolturas hídricas que cubren 70% de su superficie, y la parte gaseosa, o atmósfera, omnipresente. Como todo interfase, aquella se caracteriza por fenómenos específicos, entre los cuales el de mayor importancia es la vida, llamada "biosfera" para enfocarla como conjunto. Esta interfase es sometida a las acciones antagónicas de las fuerzas internas y externas. Ella abriga al hombre, como participante en la biosfera. Es también en ella que se desempeñan las relaciones conflictivas Hombre-Medio Ambiente.

Los dos elementos integrantes de la interfase son la envoltura gaseosa y la superficie de la litosfera (parte sólida del Globo).

—La **envoltura gaseosa** consiste de 4 niveles escalonados, caracterizados por una densidad decreciente de la materia. La mayor tenuidad se encuentra en la ionosfera, cuya definición se ha recordado más arriba. La troposfera no desempeña un papel muy específico en el sistema ambiental. Pero, sí es el caso de la estratosfera, con el ozono. Entre los 4 pisos de la envoltura gaseosa, existen intercambios permanentes de materia, principalmente gaseosa: así pueden llegar hasta la superficie terrestre los isótopos de C y de O que se incorporan en el cuerpo de los seres vivos. Estos gases, calentándose, permiten también intercambios de energía. La troposfera, por ejemplo, llega a temperaturas muy altas, pasando los 100°C. Una parte importante de la energía radiante del Sol, la absorbe la envoltura gaseosa del Globo, lo que debe tomarse en cuenta tanto cuando se estudia la productividad metabólica de los productores primarios como cuando se estudia el ambiente terrestre por le medio de los sensores remotos (transmisividad atmosférica, ventanas que dejan pasar las ondas pero que coinciden con longitudes de ondas bien definidas, en función de la absorción: el vapor de agua, alrededor de 1,5 μm , el gas carbónico entre 2 y 3,5 μm y entre 5/6 y 8 μm y más allá de 14 μm).

La energía de radiación solar absorbida por la atmósfera se traduce en diferencias de temperatura y, en consecuencia, de densidad de las masas de aire. Es lo que provoca la circulación atmosférica. El resultado es una diferenciación geográfica de la superficie terrestre. Ella resulta en primer lugar de un fenómeno astronómico: la combinación del movimiento de la Tierra a lo largo de su órbita y de su propia rotación alrededor del eje de los polos, inclinado sobre el plano de la órbita. De ahí proceden los círculos polares, los trópicos y el ecuador; es decir, líneas astronómicas que definen una **zonalidad**. Pero, la superficie terrestre no es homogénea, todo lo contrario: ofrece una fuerte anisotropía. El relieve, comenzando por la orientación de una vertiente hasta una **cadena montañosa** como la del Himalaya o la de los Andes, influye

sobre la radiación solar y, cuando se trata de relieves extensos, sobre la circulación atmosférica. Lo indica la flecha que sale de "Morfogénesis, Relieve" y llega a "Clima". Pero, la mayor anisotropía de la superficie, la encontramos en las grandes superficies acuáticas de los océanos y mares, que cubre el 70% del total, en cifras redondas. El albedo del agua es distinto del de la tierra. No existe cubierta vegetal sobre los océanos. Las características térmicas del agua son bien distintas de aquellas de la litósfera; principalmente, del agua es el calor específico más alto. Se calienta despacio, almacena muchas calorías, y se enfría despacio. Además, el agua es un fluido, lo que permite la formación de corrientes tanto superficiales como verticales, de convección, acompañadas del transporte de cantidad enorme de energía. Los océanos desempeñan papel de suma importancia sobre la parte baja de la atmósfera y, en consecuencia, sobre el clima. Basta recordar el ascenso de aguas profundas frías de la corriente de Humboldt, procedentes de la Antártica. La flecha "Circulación oceánica" → "clima" es de mayor importancia.

La **circulación oceánica** resulta, originalmente, de la zonalidad de la irradiación solar, como lo indica la flecha que llega directamente de "fuerzas Externas" a "Circulación oceánica". Indirectamente, intervienen las interacciones con la atmósfera señalada por medio de las dos flechas de dirección contraria que unen ambas cajitas negras. Las variaciones de presión atmosférica provocan cambios de altitud de la superficie marina. Los vientos fuertes empujan el agua, a veces de manera catastrófica como en el caso de los huracanes tropicales, o de fuertes tempestades de las latitudes templadas, como cuando se rompieron los diques de los pólderes holandeses en la post-guerra. Pero, en realidad estas acciones de la atmósfera sobre la circulación oceánica son de menor importancia que la acción de la circulación oceánica sobre la atmósfera.

En el caso de la circulación oceánica, debemos considerar también la anisotropía del globo terrestre. La configuración de las cubetas oceánicas, de los litorales, de los umbrales submarinos, canalizan la circulación de las grandes masas acuáticas. Por ejemplo, la corriente del Golfo estaba bloqueada por el largo umbral que une Islandia a los Shetland durante la regresión generada por la última glaciación. Esto ocasionó que el enfriamiento del Atlántico Nororiental fuera excesivo en comparación de aquel del Atlántico subtropical, a los 30° de latitud. Ora bien, aquella topografía oceánica es la consecuencia de la tectónica del Globo, de las geoestructuras, como lo indica una flecha del organigrama. Otra flecha enfoca también la influencia directa del relieve sobre la misma circulación oceánica. En efecto, el relieve submarino no es necesariamente la única consecuencia directa de las geoestructuras: Los procesos morfogénicos han podido intervenir sobre las geoestructuras. Las regresiones de los períodos glaciares (glacio-eustatismo) en particular, por haber cambiado el nivel general de los

océanos, han desempeñado un papel importante, del cual el Atlántico Nororiental no es más que un ejemplo. Estas glaciaciones son un elemento morfogénico y no un rasgo geoestructural.

El otro componente de la interfase es la litósfera. Tomaremos esta palabra en el sentido de los geólogos y no en aquel de los geofísicos, es decir "la parte sólida superficial del Globo terrestre", sin tomar en consideración las diferencias entre la corteza y el manto. Las geoesestructuras se caracterizan por su material rocoso (litología), por la disposición de este material, resultado acumulativo de todas las deformaciones tectónicas por él sufridas a lo largo de los tiempos geológicos, y por los movimientos tectónicos contemporáneos.

Pero, la morfogénesis influye también por su parte sobre las geoesestructuras. Es una retroacción. De acuerdo con el concepto del isostatismo, un compartimento que se alza y que, por esta razón es más intensamente disectado, pierde materia y, por consecuencia, disminuye su masa, lo que desencadena a su vez una tendencia al levantamiento. La retroacción geomórfica tiene tendencia a acentuar el movimiento positivo inicial. Es una retroacción positiva. Lo mismo acontece con las unidades con tectónica negativa, es decir, que se hunden. Ellas reciben toda clase de detritos oriundos de sus márgenes lo que provoca una sobrecarga que mantiene y aumenta la tendencia al hundimiento. Este tipo de fenómenos lo indican las dos flechas, en dirección opuesta, que unen las cajas negras "Geoesestructuras" y "Morfogénesis".

Esto representa el lado "interior" de la interfase. Del lado "exterior" lo encontramos con los diversos procesos que modelan el relieve. Ellos están por una buena parte, vinculados con el clima, ya sea directa, o indirectamente. La vinculación directa la encontramos, por ejemplo, en las glaciaciones nivósos y en descensos de la temperatura. Pero no predomina. Más frecuentes y de mayor peso son las vinculaciones indirectas que pasan a través de los ecosistemas, con sus biocenosis (antes que todo, la vegetación) y sus suelos y formaciones superficiales, como lo indican las flechas: una se dirige de "clima" a "morfogénesis" (vinculación directa), otras de "clima" a "ecosistemas terrestres" y de "ecosistemas terrestres" a "formaciones superficiales, suelos" y de esta cajita a "morfogénesis". Desde hace años, hemos insistido sobre estas vinculaciones que forman el aspecto de la geomorfología llamado, por comodidad, "geomorfología climática". Este punto de vista integra la geomorfología en el ecosistema para mutuo beneficio. Es todo lo contrario de la posición de W.M. DAVIS. Este maestro, que dibujaba maravillosamente, nunca ha colocado ni siquiera la planta más pequeña sobre sus esquemas: su geomorfología "normal", a pesar de ser aquella de las regiones templadas húmedas, sólo pinta paisajes desérticos.

La morfogénesis consiste en flujos de materia, procedentes de las rocas. Estos flujos se llevan detri-

tos de rocas desde las áreas más altas hasta otras, más bajas. El agua corriente es el principal agente transportador, pero el hielo de los glaciares y el viento intervienen también, a menudo en ciertas regiones climáticas. Los flujos consisten de partículas de diversos tamaños: bloques, guijarros, arena, limos, arcilla y iones. El arrastre se realiza según los casos como carga de fondo, en suspensión o en solución. Estos flujos interfieren con los ecosistemas. Cuando son violentos y masivos, constituyen un factor ecológico limitante. En los ecosistemas terrestres, la inestabilidad del hábitat hace que predominen las especies pioneras sin que aparezcan comunidades más evolucionadas. Es lo que puede observarse, por ejemplo, sobre los bancos aluviales frecuentemente retrabajados de los ríos o en áreas de cárcavas vivas. En las regiones tropicales, cuando hay un suministro excesivo de materia en suspensión, los corales no logran crecer. Pero, por otra parte, los iones disueltos y algunas partículas en suspensión, sirven como nutrientes tanto en las llanuras inundables como en los estuarios, deltas y franjas litorales. Lo indican las flechas que salen de "morfogénesis" y llegan a "ecosistemas terrestres" y "ecosistemas marinos". La vinculación de dirección contraria evoca la influencia de las biocenosis sobre la morfogénesis: fenómenos tales como la edificación de atolones y barreras por los madréporos, la fijación del lodo por el manglar, el efecto protector de la cubierta vegetal, principalmente del estrato herbáceo (fitostasia), etc...

Existe una vinculación muy estrecha entre la morfogénesis y las formaciones superficiales. W. PENCK la ha enfocado con la expresión "formaciones correlativas" propuesta por él mismo. Frecuentemente, son las formaciones superficiales que nos permiten deducir la acción pasada de tal o tal proceso. Por ejemplo, desde fines del siglo XVIII, B. de SAUSSURE ha reconocido la extensión anterior de los glaciares en Saboya por la identificación de morenas. Podríamos traducir el dicho "No hay humo si no hay fuego" por "no hay morenas sin que haya glaciares". Por otra parte, ciertas formaciones superficiales son el resultado de la modificación de la roca *in situ* al contacto de la atmósfera (procesos de meteorización): como la fragmentación por las alternancias hielo-deshielo, por la hidratación, la expansión y retracción por cambios de temperatura, etc... Más importantes aún son los efectos indirectos, influenciados por los seres vivos: excavación de galerías y ablandamiento de la tierra por los insectos, los roedores y otros animales y, sobre todo, los efectos químicos (alteración) que resultan de la penetración hasta la roca de soluciones con gas carbónico, ácidos orgánicos generados por la descomposición de la materia orgánica, principalmente vegetal, de los suelos.

Alteración y meteorización, frecuentemente combinadas entre sí, son el primer paso de la morfogénesis, o fase preliminar. Por lo general transforman rocas coherentes en partículas lo su-

ficientemente pequeñas para que las lleven los procesos de arrastre. Es bien claro que estos procesos son diferentes de una roca a otra: lo indica la flecha que va de "Geoestructuras" (litología) a "formaciones" superficiales (en este caso, es la "litología" que la que está es involucrada). Aquellos procesos, los influencia también el clima, pero para no sobrecargar el organigrama, no hemos dibujado la flecha correspondiente.

Las relaciones entre la morfogénesis y los suelos son, también, numerosas y de naturaleza grande. Por lo general, los suelos se forman a partir de formaciones superficiales y no de la roca *in situ*. Pero existen otras vinculaciones más. En 1965, he elaborado el concepto de **balance morfogénesis / pedogénesis**. Si no se altera la topografía superficial, su estabilidad permite el desarrollo de los suelos que corresponden a las características del área. La pedogénesis funciona. Pero por otro lado, la estabilidad topográfica indica que no hay morfogénesis. El balance se torna completamente en favor de la pedogénesis. Al contrario, si hay flujos detríticos importantes, que modifican rápidamente la topografía, los suelos no tienen tiempo desarrollarse tanto en los sitios desde los cuales salen los detritos, como en aquellos donde se acumulan. Tal es el caso de las cárcavas activas. Por lo general, además, las áreas donde la morfogénesis es intensa están también mal protegidas por la vegetación. Una vegetación muy abierta suministra pocos detritos vegetales, lo que es desfavorable para la pedogénesis. El balance, en este caso, se torna más en favor de la morfogénesis. Preocupación constante de la civilización incaica, era detener la tierra sobre las vertientes, edificando andenes. Usando nuestro vocabulario, diremos que los campesinos incaicos, con los andenes, buscaban una estabilización topográfica de las pendientes para conservar el suelo. Ellos invertían el balance morfogénesis/pedogénesis en favor de la pedogénesis.

Los **balances hídricos** son otro componente importante del ambiente terrestre. En la mayor parte de los casos, y no sólo en las regiones secas, es la cantidad de agua disponible lo que determina el crecimiento de los vegetales y, por consecuencia, el rendimiento de los cultivos. Si no hay agua suficiente, la planta se marchita y, después, se muere. Pero, antes de marchitarse, detiene la elaboración de células, es decir su crecimiento. El balance hídrico es función del agua del suelo, y, por otro lado, de sus pérdidas (infiltración más profunda, evaporación, extracción por las raíces...). La alimentación, la realizan las lluvias o inundaciones. La evaporación es también función del clima (viento, humedad relativa, temperatura). Pero, por la evaporación, el suelo devuelve agua, bajo la forma de vapor, a la atmósfera y, así, influye sobre el clima. Las flechas que unen las dos cajitas lo indican. Pero, la infiltración del agua en el suelo y su almacenamiento, los rigen las características del propio suelo (velocidad de filtración, capacidad de reten-

ción). La granulometría del material y la disposición de las partículas que lo componen son los más importantes factores de los cuales depende el balance hídrico. Para más claridad, el organigrama representa por flechas sólo las vinculaciones entre el balance hídrico y el clima, por un lado, y con los ecosistemas, por el otro. No se dibujaron flechas entre ese balance y las formaciones superficiales-suelos y la morfogénesis a pesar de que existen.

Por fin, los ecosistemas.

El caso de los ecosistemas marinos es más simple. Ellos dependen de la circulación oceánica que rige la temperatura y las características físicas y químicas del agua de un lado, de las posibilidades de fotosíntesis, que son función de la radiación solar y de la turbidez del agua (penetración de la radiación) y, por fin, de una manera menos determinante, de los aportes de nutrientes que llegan de las tierras vecinas.

Otras inter-relaciones más entran en juego en el caso de los ecosistemas terrestres: el relieve, como factor de diferenciación climática, la morfogénesis, como factor limitante (concepto de estabilidad topográfica), las formaciones superficiales y suelos, las posibilidades de fotosíntesis, los balances hídricos y el clima (directamente). Todos son integrantes del ambiente ecológico, lo que se llama el biotopo. Desgraciadamente, los biólogos, que, generalmente, no han sido formados en geografía física, han descuidado por completo el estudio de los biotopos. La palabra, en sí misma, es significativa, como "toposecuencia" en edafología. "Topos", en griego significa "lugar". Su sentido es descriptivo, adecuado para algo que no cambia. Un mapa topográfico es una imagen del área. El biotopo no tiene contenido dinámico. Es un empobrecimiento. En realidad, existen múltiples inter-relaciones entre las dinámicas de las biocenosis y las del ambiente. Un ambiente donde la morfodinámica es intensa, topo-inestable, perjudica la evolución de las comunidades vegetales. Por ejemplo, en las selvas ombrofilas de la falda amazónica de los Andes, numerosos son los movimientos de remoción en masa. Ellos limpian por completo la selva y desnudan el subsuelo, las formaciones de alteración, a veces la roca *in situ*, a decenas de metros de profundidad. Abren claros en la selva. Los colonizan especies pioneras, que requieren mucha luz. En las latitudes ecuatoriales, todavía pueden identificarse los antiguos derrumbes durante unos 40-50 años. Es sólo después de este tiempo que se ha reconstituido un bosque cuya fisonomía se asemeja lo suficiente a la selva ombrófila y no puede identificarse sobre la aerofotografía. Este proceso, de "régimen permanente" como dirían los físicos, mantiene una diversidad específica en el bosque que aumenta su homeostasia, es decir su capacidad de mantenerse por ejemplo en el caso de deforestación o de cambios climáticos como se han registrado en Amazonia.

Estudiar las inter-relaciones entre las biocenosis y la dinámica ambiental, la ecodinámica, es un

tema de investigación prometedor. No sólo nos permitirá lograr el pleno desarrollo de la ecología en vez de limitarnos a una ciencia truncada; pero, lo que es más importante ello nos permitirá lograr el uso más racional de los recursos naturales, a través

del manejo no destructivo y del ordenamiento que pueda aumentarlos. La rápida expansión demográfica en el mundo, la permanencia de la pobreza, la acentuación de la desigualdad entre los hombres tornan de suma urgencia tal orientación científica.