

LA HIPÓTESIS GAIA

Hace unos cuarenta años un científico británico, James Lovelock propuso un concepto hipotético denominado Gaia en homenaje a la antigua diosa de la tierra. El nombre de Gaia fue puesto con la ayuda de William Golding, el autor de “El Señor de las Moscas”.

Lovelock provocó una sacudida en muchos científicos con una mente más lógica, sobre todo cuando Lovelock tenía fama de ser un científico con credenciales sólidas, conocido por ser el hombre que había diseñado los instrumentos de algunos experimentos para buscar vida en la superficie de Marte. La teoría fue publicada bajo el título de “Una nueva visión de la Vida sobre la Tierra”, en el marco de unas jornadas científicas celebradas en Princeton (Estados Unidos).

Hay que puntualizar que anteriormente a la aparición de la Teoría Gaia, un biólogo ruso llamado Vladimir Vernadsky publicó en los años 20 su “Teoría de la Biosfera” con semejantes sugerencias.

Retrocediendo aún más en el tiempo encontramos muchos otros esbozos de esta curiosa teoría. A comienzos del siglo VI a. de C., Tales de Mileto pensaba que determinados elementos aparentemente inanimados podían estar vivos, doctrina conocida como hilozoísmo. Una generación después Anaxímenes sostenía que *“el aire funcionaba a modo de respiración del mundo”*, y Anaxágoras sostuvo que *“una mente omnipotente controlaba toda la materia, animada e inanimada, aún cuando no estaba en toda ella”*. Hipócrates sostenía una visión holística de la vida: *“hay una corriente común, una respiración común, todas las cosas se encuentran en simpatía”*. Pitágoras y su escuela de Trotona llegaron a sostener: *“la Tierra es un ser íntegro, vivo, inteligente”*, idea que también sostuvo Johannes Kepler. En 1785, el científico inglés James Hutton presentó una monografía a la Royal Society de Edimburgo, en la que realizó la siguiente afirmación: *“Considero que la Tierra es un superorganismo y que su estudio apropiado debería hacerse mediante la fisiología”*.

La hipótesis Gaia considera que las múltiples formas de vida no solo influyen colectivamente en su medio ambiente para obtener de él condiciones más favorables para su existencia, sino que la vida misma actúa de tal manera que verdaderamente es ella quien regula y controla su medio ambiente. El nombre del planeta vivo, Gaia, no es un sinónimo de biosfera. La biosfera se define como la parte de la Tierra en que normalmente existen los seres vivos. Tampoco Gaia es lo mismo que biota, que simplemente se refiere al conjunto de todos los organismos vivos. El biota y la biosfera tomados conjuntamente forman parte de Gaia. Gaia tiene una continuidad que se remonta en el pasado hasta los orígenes de la vida y que se extiende en el futuro de la medida en que la vida persista.

La hipótesis Gaia dice que la temperatura, el estado de oxidación, de acidez y algunos aspectos de las rocas y las aguas se mantienen constantes en cualquier época, y que ésta homeostasis se obtiene por procesos cibernéticos llevados a cabo de manera automática e inconsciente por el biota. La energía solar sustenta estas condiciones favorables para la vida. Estas condiciones son sólo constantes a corto plazo y evolucionan en sincronía con los cambios requeridos por el biota a largo de su evolución. La vida y su entorno

están tan íntimamente asociados que la evolución afecta a Gaia, no a los organismos o al medio ambiente por separado.

La hipótesis Gaia no sólo contradecía la mayor parte de los postulados científicos precedentes y ponía patas arriba los modelos teóricos anteriormente aceptados, sino que ponía en entredicho la Teoría de la Evolución de Darwin: la vida se ha ido adecuando a las condiciones del entorno fisicoquímico. La hipótesis Gaia defendía justamente lo contrario: la biosfera es la encargada de generar, mantener y regular sus propias condiciones medioambientales, de forma que se produce una coevolución entre lo biológico y lo inerte. Aparte de Lynn Margulis, el único que tuvo en cuenta el medio ambiente cuando considera el fenómeno de la vida fue J.Z. Young. En 1971 escribió de forma independiente a otros estudios, un capítulo sobre homeostasis en su libro, "*An Introduction to the Study of Man*". Según sus propias palabras, "la entidad que se mantiene intacta, y de la que todos formamos parte, no es la vida de uno de nosotros, sino en última instancia el conjunto de la vida en el planeta". A través de la teoría de Gaia entiende la Tierra y la vida en ella como un sistema, un sistema que tiene la capacidad de regular la temperatura y la composición de la superficie de la Tierra, y de manera idónea para los organismos vivos. La autorregulación del sistema es un proceso activo impulsado por la energía libre proporcionada por el Sol.

La primera reacción observada después de la presentación de la teoría Gaia a principios de los años setenta fue de ignorancia en el sentido más literal. La mayor parte de la hipótesis de Gaia fue ignorada por los científicos profesionales. Y sólo a finales de los setenta empezó a ser criticada. Las críticas de W. Ford Doolittle en "*CoEvolution Quarterly*" de 1979: Gaia había sido vista por primera vez desde el espacio y se utilizaron argumentos termodinámicos. Otros dos críticos ilustres fueron el climatólogo Stephen Schneider, de Colorado y el geoquímico H.D. Holland, de Harvard. Preferían explicar los acontecimientos en la evolución de las rocas, el océano, el aire y el clima sólo mediante fuerzas físicas y químicas. Para muchos científicos, Gaia era un concepto teleológico que requería ser previsto y planificado por el biota. Al no observar ningún mecanismo de control planetario denegaron su existencia como fenómeno y reclamaron la hipótesis de Gaia como teleológica.

Según Lovelock, la evidencia muestra que la corteza de la Tierra, los océanos y el aire son el producto directo de las cosas vivas o han sido modificados de forma masiva por su existencia. Tengamos en cuenta que el oxígeno y el nitrógeno del aire provienen directamente de las plantas y microorganismos y que la creta y las calizas son las conchas de cosas vivas que una vez flotaron en el mar. La vida no se ha adaptado a un mundo inerte determinado por la mano muerta de la física y la química. Los organismos se adaptan a un mundo en que el estado material viene determinado por las actividades de sus vecinos; ello significa que la transformación del medio ambiente es parte del juego. A escala local, la adaptación es un mecanismo mediante el que los organismos pueden superar ambientes desfavorables, pero a escala planetaria el acoplamiento entre la vida y su ambiente es tan estrecho que el concepto tautológico de "adaptación" se deriva de la misma existencia. La evolución de las rocas y del aire y la evolución del biota no pueden estar separados.

Existen dos reparos principales a Gaia; el primero, como ya se ha dicho es que se trata de un concepto teleológico, y que para la regulación del clima y de la composición química a escala planetaria hace falta una especie de capacidad de predicción, de

clarividencia. El segundo reparo, expresado de forma muy clara por Stephen Schneider, se refiere a que la regulación biológica sólo es parcial, y que el mundo real es el resultado de una coevolución de lo vivo y lo inorgánico.

Lovelock luchó con el problema de reducir la complejidad de la vida y el medio ambiente a un esquema simple que pudiera iluminar sin distorsiona: el mundo de las margaritas.

Imaginemos un planeta casi del el mismo tamaño que la Tierra, girando sobre su eje y orbitando, alrededor de una estrella de la misma masa y luminosidad que el Sol. Tiene más área continental y menos océano, pero está bien provisto de agua y las plantas crecerán en cualquier parte de la superficie continental donde el clima sea adecuado. Existen margaritas de diferentes colores: oscuras, claras y de colores neutros. La estrella que caliente e ilumina el mundo de las margaritas comparte el Sol el aumentar su emisión de energía a medida que envejece. Al principio de la vida en la Tierra hace unos 3800 millones de años, el sol era alrededor de un 30 % menos luminoso. En unos cuantos miles de millones de años más, será tan caliente que toda la vida que conocemos ahora morirá o deberá encontrar otro planeta. El mundo de las margaritas está simplificado. El ambiente se circunscribe a una sola variable, temperatura, y el biota a una sola especie, margaritas. Si es demasiado frío, por debajo de 5° C, las margaritas no crecerán; su temperatura óptima se sitúa alrededor de los 20° C. Si la temperatura sobrepasa los 40° C será demasiado caliente. La temperatura media del planeta resulta del sencillo balance entre calor recibido de la estrella y el calor perdido en forma de radiación infrarroja de onda larga. En la Tierra este balance de calor se complica por el efecto de las nubes y los gases como el dióxido de carbono. Asumimos que el mundo de las margaritas tiene una cantidad de dióxido de carbono, la suficiente para que las margaritas crezcan, pero no excesiva como para que interfiera con el clima. De manera semejante no hay nubes durante el día. Para no estropear la sencillez del modelo siempre llueve de noche.

La temperatura media del mundo de las margaritas viene determinada por el grado medio de oscurecimiento del color del planeta: el albedo. Si el planeta tiene una superficie oscura o albedo bajo, absorbe más calor que la luz solar y la superficie se calienta. Si el color es claro, el 70 o el 80 % de la luz solar es reflejada de nuevo hacia el espacio.

Retrocedamos en el pasado del mundo de las margaritas. La estrella que lo caliente era menos luminosa; en la región ecuatorial la temperatura del suelo desnudo, 5° C, era suficiente para el crecimiento. Aquí germinarían y florecerían lentamente las semillas de las margaritas. Supongamos que en la primera cosecha se encontraban especies multicoloreadas, oscuras y claras, en proporciones semejantes. Las oscuras se verían favorecidas incluso antes de que la estación de crecimiento hubiera acabado. Su mayor absorción de la luz solar en los sitios donde crecían las hubiera calentado por encima de los 5° C. Las margaritas con colores claros estarían en desventaja. Sus flores blancas hubieron palidecido y muerto porque al reflejar la luz solar se hubieran enfriado por debajo de la temperatura crítica de 5° C.

En la estación siguiente hubiéramos apreciado un predominio de las oscuras, ya que sus semillas serían más abundantes. Su presencia calentaría no sólo a las mismas plantas sino que, en la medida que crecieran y se dispersaran por la superficie desnuda,

calentarían el suelo y el aire. Se produciría una realimentación positiva que daría lugar a una colonización de la mayor parte del planeta por margaritas oscuras. La extensión de las margaritas oscuras se encontraría limitada por un incremento global de temperatura por encima de su óptimo. Cualquier proliferación adicional de estas margaritas daría lugar a una caída de la producción de semillas. Además, cuando la temperatura global fuese alta, las margaritas claras crecerían y se extenderían en competencia con las oscuras. El crecimiento y extensión de las margaritas blancas estaría entonces favorecida por su capacidad natural para mantener el clima frío.

Al envejecer la estrella hipotética se hace más caliente, la proporción de margaritas oscuras y claras cambia hasta que el flujo de calor es tan grande que incluso la cosecha de margaritas más blancas no puede mantener el planeta por debajo del límite superior de 40° C para el crecimiento. El planeta vuelve a ser yermo de nuevo y tan caliente que ya no hay manera de que puedan florecer nuevas margaritas.

Este ejemplo muestra que una propiedad del medio ambiente global, la temperatura, es regulada de manera efectiva en un intervalo amplio de luminosidad por un biota planetario imaginario, sin necesidad de suponer ninguna capacidad de predicción o planificación. Constituye una refutación definitiva de la acusación de que la hipótesis Gaia es teleológica.

La estrecha interrelación entre la vida y su medio ambiente, Gaia, incluye:

- 1) Organismos vivos que crecen vigorosamente, explotando cualquier oportunidad ambiental posible.
- 2) Organismos que están sujetos a las reglas darwinianas de la selección natural: las especies de organismos que dejan más descendientes supervivientes.
- 3) Organismos que afectan a su ambiente físico y químico. Así los animales modifican la atmósfera mientras respiran tomando oxígeno y exhalando dióxido de carbono. Plantas y algas realizan el proceso inverso.
- 4) La existencia de limitaciones o ataduras que establecen los límites de la vida. Puede hacer demasiado calor o demasiado frío; entre los dos extremos existe una temperatura adecuadamente templada, el estado óptimo.

Otra crítica a la teoría, plantea que el concepto de homeostasis planetaria, por y para los organismos vivos, es imposible porque requiere la evolución de algún tipo de comunicación entre las especies, además de una capacidad de previsión y planeamiento. Los autores de esta crítica no tienen en cuenta la evidencia empírica de que la Tierra ha mantenido un clima favorable para la vida a pesar de las mayores perturbaciones, o que la atmósfera tiene una composición estable a pesar de la incompatibilidad química de sus gases componentes.

La teoría de Gaia esperaría que la evolución del medio ambiente químico y físico y de las especies se produjera conjuntamente. Habría periodos largos de homeostasis, con cambios pequeños en el medio ambiente y en la distribución de las especies, que serían interrumpidos por cambios súbitos de ambos órdenes. Estos periodos puntuales podrían

ser originados internamente por la evolución de algunas especies poderosas, como el hombre, cuya presencia altera el medio ambiente, o el resultado de influencias externas tales como el impacto de asteroides.

En la Naturaleza, las relaciones que enlazan el crecimiento con alguna variable ambiental frecuentemente consisten en la combinación de un crecimiento logarítmico sobrepasado por una caída logarítmica. Cuando aumenta la concentración de oxígeno aumenta el crecimiento de los consumidores, pero el exceso de oxígeno es venenoso.

La teoría de Gaia conlleva una visión de la Tierra en la que:

- 1) La vida es un fenómeno a escala planetaria. A esta escala es casi inmortal y no tiene necesidad de reproducirse.
- 2) Los organismos vivos no pueden ocupar un planeta parcialmente. La regulación del medio ambiente requiere la presencia de un número suficiente de organismos vivos. Cuando la ocupación es parcial las fuerzas inevitables de la evolución física y química pronto lo convertirían en inhabitable.
- 3) Nuestra interpretación de la gran visión de Darwin ha cambiado. Ya no es suficiente decir “organismos mejor adaptados que otros tienen más probabilidad de dejar descendencia”. Es necesario añadir que el crecimiento de un organismo afecta a su medio ambiente físico y químico, por tanto la evolución de las especies y la evolución de las rocas están estrechamente ligados como un proceso único e indivisible.
- 4) La ecología teoría se ha ampliado. Tomando conjuntamente las especies y su medio ambiente físico como un solo sistema, por primera vez podemos construir modelos ecológicos que son matemáticamente estables y que sin embargo incluyen un gran número de especies en competición. En estos modelos el incremento de la diversidad entre las especies da lugar a una mejor regulación.

Pero Lovelock no se limitó a exponer una hipótesis, sino que presentó una serie de pruebas.

Los procesos naturales se mueven hacia un incremento del desorden medido por la entropía, cantidad que siempre aumenta. La entropía de una sustancia tiene un valor prácticamente nulo en el cero absoluto a -273° C. Al añadir calor a un cuerpo material no sólo aumenta la temperatura sino también la entropía. Schrödinger concluyó que la propiedad más sorprendente de la vida es su capacidad de desplazarse hacia arriba contra el flujo del tiempo. La vida es una contradicción paradójica a la segunda ley, que establece que todo está, ha estado y estará moviéndose hacia abajo, hacia el equilibrio y la muerte. Sin embargo, la vida evoluciona hacia una mayor complejidad y se caracteriza por una improbabilidad omnipresente. La vida no tiene manera de violar la segunda ley, ha evolucionado con la Tierra como un sistema estrechamente acoplado para asegurarse la supervivencia.

Si la segunda ley nos dice que la entropía del universo aumenta, ¿Cómo se las arregla la vida para evitar la tendencia general a la degeneración? J. D. Bernal escribió *“la vida forma parte del tipo de fenómenos que son sistemas abiertos o en reacción continua y son capaces de disminuir su entropía interna a expensas de la energía libre tomada del medio ambiente y subsiguientemente devuelta al mismo en forma degradada”*. Por el hecho de vivir, un organismo genera entropía continuamente, y provoca un flujo de entropía hacia fuera a través de sus límites. Una aportación crucial de la generalización de Schrödinger sobre la vida fue que los sistemas vivos tienen límites. Los organismos vivos son sistemas abiertos en el sentido de que toman y excretan energía y materia. Son tan abiertos como los límites del universo. Sin embargo, también están encerrados en una jerarquía de límites internos. Gaia existe por su nivel único de reglas de funcionamiento, un nivel sin duda tan complejo como el de los organismos y por tanto digno de contar con su propia ciencia, a la que Jim Lovelock denomina Geofisiología

Lovelock llegó a la conclusión de la teoría Gaia en un trabajo científico para buscar vida en Marte colaborando con la Nasa en el proyecto Vinking. Descubrieron que los pálidos colores de los planetas vecinos contrastaban con el tono verde azulado de la Tierra, porque sus atmósferas eran totalmente diferentes. La misma composición del aire terrestre proclama la innegable existencia de vida. La atmósfera terrestre contiene una gran cantidad de oxígeno libre, lo que indica que tiene que haber algo que lo esté reponiendo constantemente. Si no fuera así, hace mucho tiempo que el oxígeno atmosférico habría reaccionado con otros elementos como el hierro de la superficie y habría desaparecido.

La Tierra pues tiene una atmósfera dominada por nitrógeno y oxígeno. Solo se encuentran algunas trazas de dióxido de carbono, muy por debajo de las expectativas de la química planetaria. También hay gases inestables, como el óxido nitroso, y gases como el metano que reaccionan rápidamente con el abundante oxígeno.

La sorprendente improbabilidad de la atmósfera de la Tierra revela la presencia de negentropía y de la invisible mano de la vida. Tomemos por ejemplo el oxígeno y el metano, ambos en proporciones constantes; sin embargo, en presencia de la luz solar reaccionan químicamente para producir dióxido de carbono y vapor de agua. La concentración de metano es de alrededor de 1,5 ppm en cualquier parte de la tierra. Ello implica que cerca de 1000 millones de toneladas de metano se introducen anualmente en la atmósfera para mantenerlo a un nivel constante. Además, el oxígeno utilizado en la oxidación del metano debe ser reemplazado. La única explicación posible para la persistencia de esta atmósfera inestable, pero de composición constante, durante periodos mucho más extensos que el tiempo de reacción de sus gases es la influencia de un sistema de control, Gaia.

Es la vida lo que produce el oxígeno en nuestro aire; y con ese mismo oxígeno cuenta la vida para sobrevivir. Luego la composición atmosférica terrestre representa una violación de las reglas de la química. Lovelock descubrió en el permanente desequilibrio entre los gases atmosféricos una de las primeras evidencias de intervención de Gaia. Según la teoría Gaia, la atmósfera no sería saludable para la vida si la biosfera no se encargara de mantenerla en condiciones, intercambiando constantemente sustancias reguladoras entre uno y otro medio.

Hacia 1971 viajó a la Antártica para investigar el ciclo del azufre, descubriendo el compuesto dimetil sulfuro, del cual hoy se sabe que la fuente principal no es el océano abierto, sino las aguas costeras ricas en fitoplancton. Este gas, estimula la formación de núcleos de condensación para el vapor de agua, elevando la concentración nubosa.

En 1979 publicó Gaia, una nueva visión de la Tierra (“Gaia, a New Look at Life on Herat”, Oxford University Press). En ella definía a Gaia como una *“entidad compleja que afecta a la biosfera de la Tierra, de las ballenas a los virus y de los robles a las algas, la atmósfera, los océanos y el suelo, con la totalidad, constituyendo un feedback o sistema cibernético que busca un entorno físico y químico que sea óptimo para la vida en este planeta. El mantenimiento de condiciones relativamente constantes por medio del control activo puede describirse de modo conveniente con el término de homeostasis”*.

En 1987 en la conferencia de Camelford realizó el siguiente comentario: *“La Tierra está viva, la Tierra es un superorganismo; reconozco que un poco provocativamente, porque pienso que mis colegas necesitan un poquito de provocación”*.

Ese mismo año expuso que el ciclo de actividad de las algas es lo que en última instancia había determinado la temperatura de la Tierra a lo largo de la historia. La presencia de un alto nivel de dimetil sulfuro producido por las algas estimula la formación nubosa, oscureciendo la superficie con el consiguiente descenso de las temperaturas. El calor hace crecer las algas y el frío dificulta el crecimiento, comenzando una nueva escala térmica. Así defiende Lovelock la autorregulación de la temperatura por parte de Gaia.

Al surgir el Sol, este era más pequeño y templado y su radiación un 30 % menos intensa. Sin embargo el clima resultaba favorable para la aparición de las primeras bacterias: no hacía un 30 % más frío, pues habría un planeta devastado por los hielos eternos. Carl Sagan y George Mullen han propuesto la presencia en la ancestral atmósfera de mayores cantidades de amoníaco y dióxido de carbono, conservando el calor e impidiendo que escape hacia el espacio. Cuando la intensidad de la radiación fue aumentando, la aparición de organismos devoradores del amoníaco y dióxido de carbono habría disuelto la capa protectora, de forma que el exceso de calor pudiese disiparse al espacio: la biosfera misma fue transformando las condiciones ambientales.

Para Lovelock es más interesante la cuestión de la cantidad de sal en el mar. Su concentración es la adecuada para las plantas y animales marinos. Cualquier aumento sería desastroso. Sin embargo, según toda lógica científica normal, los mares deberían ser mucho más salados. Los ríos están disolviendo continuamente las sales de los suelos por los que fluyen y las transportan a los mares. El agua de los ríos que llega al océano no permanece en él, sino que se elimina por evaporación para formar nubes que terminan cayendo de nuevo como lluvia, mientras que las sales que contenían estas aguas no. Luego algo actúan para eliminar el exceso de sal en el mar. A veces, las bahías y brazos de mar poco profundos se quedan aislados. El sol evapora el agua y quedan lechos salinos que con el tiempo son recubiertos por polvo, arcilla y finalmente roca impenetrable, de forma que cuando el mar vuelve para recuperar la zona, la capa de sal fósil está sellada y no se redisuelve. De esta forma el mar podría liberarse de exceso de sal y mantener su concentración salina.

En su segundo libro, “The ages of Gaia”, Lovelock introdujo las nociones postuladas por Hutton, proponiendo una unión de las ciencias de la Tierra en una nueva ciencia, la Geofisiología.

Pasemos a estudiar más en profundidad y por partes las ideas que Lovelock tenía acerca de Gaia.

EL ARCAICO

La vida empezó hace tres mil seiscientos millones de años; hace 3,6 eones, durante un periodo denominado el Arcaico: comprende desde la formación de la Tierra, hace 4,5 eones, hasta el periodo en que el oxígeno empezó a dominar la química de la atmósfera, hace 2,5 eones.

¿Cómo podemos estar seguros de que el origen de la Tierra está asociado con la explosión de una supernova? Incluso hoy en día la Tierra es radiactiva y está constituida de elementos como el hierro, el silicio y el oxígeno que no pueden ser fabricados en el proceso normal de la evolución estelar. El calor generado por la desintegración de los elementos radiactivos es lo que mantiene el interior de la Tierra caliente e impulsa el movimiento de la corteza.

Los registros de las rocas sugieren que la vida empezó entre 0,6 y 1 eón después de que la Tierra se hubiera agregado en forma de cuerpo planetario reconocible. Las rocas sedimentarias más antiguas de la Tierra que se conocen hasta el momento tienen una edad de 3,8 eones, y proceden de un lugar llamado Isua en Groenlandia.

El periodo anterior a la vida no ha dejado rocas a partir de las cuales podamos reconstruir los detalles del medio ambiente en que se formaron. Cuatro eones de erosión y desmenuzamiento han borrado el registro. Es posible que haya habido un tiempo de gran violencia, con la caída de asteroides. Esto dejó una Tierra tan llena de cráteres como la Luna. Fue el periodo llamado, de forma acertada, hadiano, es decir, infernal.

La atmósfera es una región de transformaciones químicas rápidas bajo la influencia de la luz del Sol. La atmósfera tiene la menor masa de todos los compartimentos ambientales con los que la vida se encuentra. Excepto en lo que se refiere a las pequeñas concentraciones de gases raros, como el argón y el helio, todos los demás gases del aire han existido recientemente como una parte de los sólidos y los líquidos de las células vivas. La atmósfera también tiene un efecto inmediato tanto sobre el clima como sobre el estado químico de la Tierra, aspectos de crucial importancia para la vida.

Antes de que se convirtiese en el hábitat para la vida, la Tierra debía ser un planeta muerto de atmósfera cercana al equilibrio. Sería “el estado estacionario abiótico”.

Se supone que la Tierra primitiva contenía en su superficie los compuestos químicos a partir de los cuales se formó la vida, compuestos denominados “orgánicos”. No sólo la química de la Tierra era apropiada para que empezase la vida, también el clima. La existencia de los compuestos químicos de la vida y pre-vida requiere un intervalo de temperatura entre 0 y 50° C. Por tanto la Tierra no podía estar helada ni podía estar tan caliente como para que hirvieran las aguas. La falta de calor de un Sol más frío podría haber sido contrarrestada por una manta de gas que proporcionara un “efecto

invernadero”. Los gases con más de dos átomos en sus moléculas presentan la propiedad de absorber el calor radiante, la radiación infrarroja, que escapa de la superficie de la Tierra. Estos gases, como el CO₂, el vapor de agua y el amoníaco, son transparentes a la radiaciones visibles e infrarroja cercana, que representan la mayor parte de la energía del espectro solar. De esta forma el calor radiante penetra en el aire y calienta la superficie. Pero estos gases son opacos a la luz infrarroja de longitud de onda larga, que es irradiada por la superficie de la Tierra a la atmósfera inferior. La acumulación de calor, que escaparía al espacio, produce el “efecto invernadero”

Podemos aceptar que la vida empezó a nivel molecular a partir de procesos equivalentes a las turbulencias y torbellinos. La energía impulsora provenía del Sol y de la energía libre de una Tierra caliente y joven. Prigogine y Eigen han formulado los mecanismos físicos por los cuales productos químicos y reacciones cíclicas se combinan como estructura disipativas de la promovida. Dos geoquímicas, A.G.Cairns-Smith y Leila Coiné, han sugerido que los sólidos del medio ambiente tuvieron un papel crucial en el origen de la vida. El problema de las estructuras disipativas fluidas es que se disipan demasiado pronto. Si tienen que evolucionar hacia estructuras más permanentes se necesita algo sólido a modo de anclaje.

Las primeras células vivientes pueden haber utilizado como alimentos los productos químicos orgánicos de su alrededor, así como de cuerpos muertos de otras células. Los aportes de materia prima y energía se hicieron rápidamente escasos y en alguna época temprana los organismos descubrieron como explotar la abundante e inagotable energía de la luz solar para fabricar su propio alimento. Se cree que los primeros fotosintetizadores utilizaron la disociación fotoquímica del sulfuro de hidrógeno, que demanda menos energía. Pronto se desarrolló la mejor solución: el uso de la energía luminosa para romper los fuertes enlaces que combinan el oxígeno con el hidrógeno y el carbono. Lo consiguieron bacterias llamadas cianobacterias debido a su color azul-verdoso, y ellas son los predecesores de todas las plantas verdes que existen.

En la superficie estaban los productores primarios, las cianobacterias que utilizaban la luz del sol para fabricar compuestos orgánicos y replicarse a si mismas. También producían oxígeno, pero la abundancia de productos químicos inorgánicos reactivos en el medio ambiente mantuvo este gas próximo a su lugar de producción. También estaban presentes los metanógenos, que obtenían materia y un poco de energía a partir del reordenamiento de los compuestos moleculares de los productores. La presencia de estos organismos “carroñeros” probablemente aseguraba la recolección continua de los residuos y cadáveres de fotosintetizadores y el retorno a las zonas de fotosíntesis del carbono esencial en forma de metano y dióxido de carbono. Los metanógenos no podían, como los animales, comer las cianobacterias y utilizar el alimento que éstas habían sintetizado; para hacerlo hubieran necesitado del oxígeno.

La exitosa evolución de los fotosintetizadores habría conllevado la primera crisis ambiental de la Tierra. Para obtener su energía los fotosintetizadores habrían utilizado como fuente de carbono el dióxido de carbono del aire y los océanos. Las cianobacterias utilizan el dióxido de carbono como alimento. Destruían la capa que mantenía la Tierra caliente. Durante un tiempo los volcanes pudieron proporcionar una gran cantidad de dióxido de carbono, pero la capacidad potencial del sumidero bacteriano habría sobrepasado el aporte de este origen. Si sólo hubiera habido fotosintetizadores su florecimiento abundante en los océanos y en la superficie hubiera reducido el dióxido de

carbono a niveles muy bajos en unos pocos millones de años, la Tierra se habría enfriado hasta un estado de congelación y la vida sólo habría perdurado en los sitios en que el calor proveniente del subsuelo hubiera podido fundir el hielo, o bien el medio ambiente terrestre se hubiera desplazado a un ciclo de congelación y deshielo en la medida que el dióxido de carbono de los volcanes se acumulase y fuese eliminado de nuevo. La presencia persistente de rocas sedimentarias desde hace 3,8 millones de eones hasta ahora sugiere que el agua líquido siempre ha estado presente y que la Tierra nunca se ha congelado totalmente. Propone una interacción dinámica entre los primeros fotosintetizadores, los organismos que procesaban sus productos, y el medio ambiente planetario. A partir de ésta se puede desarrollar un sistema estable auto-regulado, un sistema que mantiene la temperatura de la Tierra constante y adecuada para la vida.

Los fotosintetizadores utilizan dióxido de carbono y lo convertían en materia orgánica y oxígeno o su equivalente arcaico, tal como lo hacen las plantas hoy en día. El oxígeno habría sido absorbido inmediatamente por la materia oxidable del medio ambiente, el hierro y el azufre en los océanos. No había una población significativa de consumidores oxidativos paciendo sobre los fotosintetizadores y devolviendo carbono al medio ambiente en forma de dióxido de carbono. No había oxígeno para que los consumidores respirasen; sólo se encontraba el producido y eliminado en yuxtaposición con los fotosintetizadores. En lugar de los consumidores oxidativos existían los metanógenos, carroñeros y descendientes de los descomponedores originales de los productos químicos. Estas bacterias primitivas, sólo capaces de existir en ausencia de oxígeno, obtenían la energía para vivir a partir de la descomposición de la materia orgánica, convirtiendo el carbono en dióxido de carbono y metano que devolvían al aire. En el Arcaico, éstas sirvieron, como los consumidores de hoy, para devolver al aire casi todo el carbono que había sido eliminado por los fotosintetizadores.

El metano es un gas que produce efecto invernadero. Se descompone bajo la luz solar ultravioleta y reacciona con radicales hidroxilo. Cuando la reacción ultravioleta rompe el metano, los productos se combinan con otras moléculas para formar una serie de compuestos químicos orgánicos complejos. En la alta atmósfera estos productos podrían incluir pequeñas gotas y partículas, un smog en la alta atmósfera que podría haber modificado el medio ambiente arcaico. Las radiaciones ultravioleta y visible del Sol habrían sido absorbidas en su presencia, y la región en que se produjera la absorción se habría hecho más caliente. Esta capa caliente habría actuado como capa de "inversión" en la baja atmósfera, y habría invertido la tendencia normal de un descenso de temperatura a medida que se asciende desde la superficie.

La brusca caída de temperatura hace 2,3 eones marca el final del Arcaico y la aparición de un exceso de oxígeno libre en el aire. Esto daría lugar a una disminución del metano hasta niveles cercanos a los de la atmósfera contemporánea, haciendo imperceptible su papel en el efecto invernadero.

El modelo está basado en la suposición de que el crecimiento del ecosistema bacteriano cesaba en el punto de congelación, era máximo a 25° C, y cesaba de nuevo a temperaturas por encima de 50° C. El sistema evoluciona rápidamente en realimentación positiva hasta aproximarse a un equilibrio. Pronto se alcanza la estabilidad y el planeta se mantiene en una homeostasis adecuada.

De acuerdo con el modelo, existe un gran contraste en la composición de la atmósfera arcaica antes y después de la vida. Se observa un incremento del nitrógeno tras el origen de la vida. El mar era más ácido debido al exceso de dióxido de carbono y era rico en ión ferroso. En estas circunstancias, el ión ferroso podría haber secuestrado una proporción importante de amonio para formar un complejo ferro-amónico estable, en cuya forma se encontraría una parte importante del nitrógeno. Tanto la caída del dióxido de carbono como la utilización del nitrógeno por la vida habrían modificado el balance a favor del nitrógeno gaseoso.

Aunque el nitrógeno no interviene en el efecto invernadero por sí mismo, el incremento de nitrógeno habría duplicado la presión atmosférica y esto habría incrementado el efecto invernadero del dióxido de carbono y el metano.

¿Cómo persistieron los océanos? La vida, en la fotosíntesis, divide el dióxido de carbono en carbono y oxígeno. Si una parte del carbono queda sepultado en las rocas de la corteza resulta un incremento neto de oxígeno. También hay que considerar las reacciones que ocurren en el fondo del océano entre el agua y el ion ferroso de las rocas basálticas. El hidrógeno libre producido constituiría un alimento para aquellas especies bacterianas que pudiesen obtener energía transformándolo en metano, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos menos volátiles que el hidrógeno. El metano descompuesto en la estratosfera por la radiación ultravioleta podría estratificar la atmósfera y retardar así la difusión de los gases procedentes de la atmósfera inferior, lo que también retardaría la fuga de hidrógeno al espacio.

LAS EDADES MEDIAS

Como el Arcaico, el Proterozoico era un tiempo en el que los ecosistemas de la Tierra estaban poblados por bacterias. En las zonas anóxicas de los sedimentos seguían viviendo las bacterias arcaicas, pero en el océano ligeramente oxidante y en los sedimentos superficiales se desarrollaron unas células vivientes más complicadas, los eucariotas.

La aparición del oxígeno como gas dominante en la atmósfera fue el acontecimiento principal que marcó un cambio profundo en el estado geofisiológico de la Tierra. No se sabe si el oxígeno del aire aumentó de forma rápida. Los ecosistemas adaptados al mundo arcaico resistirían al cambio en la medida que evolucionaran junto con el medio ambiente

Si el oxígeno era crucial en la evolución geofisiológica de la atmósfera, el calcio debió ser el elemento determinante en la geofisiología de los océanos y la corteza. Es el tercer ión en abundancia en el agua de mar, después del sodio y el magnesio. Es esencial para la vida, pero muy tóxico en su estado iónico. En caso de que el calcio se encontrara en exceso en los océanos, tal como ocurre, dicha capacidad hubiera aumentado las oportunidades de supervivencia de un organismo y de su progenie. Estos organismos estarían en ventaja en comparación con organismos que simplemente tolerasen la presencia de calcio en exceso. En la zona fótica del océano abierto, el crecimiento de estos organismos habría dado lugar a la deposición de grandes masas de calcio en el fondo oceánico. La lluvia de “conchas marinas” microscópicas llamadas frústulos, desde la superficie iluminada a las profundidades actúa como transportador, y elementos potencialmente tóxicos como el cadmio se eliminan de las regiones superficiales.

Por otra parte, el dióxido de carbono y el calcio son agregados por las comunidades bacterianas para formar estromatolitos. La concentración de iones de calcio en los océanos se habría reducido y la vida habría florecido. La ubicuidad de depósitos de calizas de origen oceánico muestra que esta actividad fue exitosa y su desarrollo continuado. Se piensa que la nucleación de estados supersaturados y otros estados metaestables en la Naturaleza es un proceso geofisiológico clave y que empezó a producirse en el Arcaico.

La deposición biológica de carbonato cálcico puede haber sido determinante en el ciclo endógeno (el lento movimiento de los elementos desde la superficie y el océano a las rocas de la corteza y de nuevo a la superficie). Don Anderson comentó en su artículo Science en 1984: *“La Tierra también es algo aparentemente excepcional porque tiene una tectónica de placas activas. Si el dióxido de carbono presente en la atmósfera de Venus se hubiera convertido en caliza, la temperatura de la superficie y manto superior descendería. La transición basalto-ecogilita migraría a profundidades más someras, dando lugar a que la parte inferior de la corteza se hiciera inestable. Puede existir por tanto la posibilidad de que el movimiento tectónico de placas de la Tierra exista debido a la evolución de vida generadora de caliza”*. El fenómeno podría haber sido desencadenado por la actividad de algunos organismos capaces de separar una solución diluida de bicarbonato cálcico en creta y dióxido de carbono y así evitar el envenenamiento por calcio.

Como ya se ha mencionado, la regulación del contenido de sal es uno de los aspectos más de los sistemas gaianos. Hay poco organismos capaces de tolerar la sal a concentraciones por encima del 6 por ciento en peso. Se dice que el medio salino interno óptimo para los organismos vivos, refleja la composición de los océanos cuando empezó la vida. La mayoría de células sobreviven y se encuentran en condiciones óptimas en un medio cuya salinidad es 0,16 molar. Muchos tipos de células sobreviven en la salinidad del agua de mar, 0,6 molar, pero por encima de 0,8 molar las membranas que mantienen el contenido del interior de las células se vuelven permeables o se desintegran completamente.

La concentración de sal en los mares actuales siempre es alta para los organismos vivos. Los mayores, como los peces, mamíferos marinos y algunos crustáceos, disponen de mecanismos para regular la salinidad interna a un nivel fisiológico (0,16 molar). Las ventajas de un medio interno de bajo contenido en sal deben de ser considerables para requerir semejante inversión. Para una célula pequeña o una bacteria, la regulación a escala individual es un lujo que está mucho más allá de sus posibilidades.

El estrés salino se produce frecuentemente durante la desecación o la congelación. Hay bacterias tolerantes a la sal, los halófilos, que viven precariamente en las regiones salinas de la Tierra. Estas bacterias han resuelto el problema directamente desarrollando evolutivamente una membrana de especial estructura que no se altera con la sal. Funciona, pero al precio es que no pueden competir con la mayor parte de bacterias cuando la salinidad es normal. Se encuentran limitadas a sus hábitats remotos y raros, y dependen del resto de la biosfera para mantener la Tierra apta para ellos.

El problema de la salinidad debe haberse presentado ya en las bacterias arcaicas. Su respuesta al problema consistía en sintetizar ciertos compuestos solubles denominados

betaínas de azufre y nitrógeno. Estos solutos neutros sustituyen a la sal y no son tóxicos para la célula. Cuando estos compuestos están presentes en las células y en el medio, la congelación o la desecación ya no dan lugar a una concentración de sales nocivas. Por tanto, el mantener los océanos tan diluidos como sea posible representa una ventaja para el biota.

El único modo de eliminar las masas de sal de los océanos sería el aislamiento de agua oceánica en lagunas seguido de la evaporación posterior del agua. Esto habría requerido la edificación de grandes arrecifes de caliza para atrapar la sal en lagunas evaporíticas.

Para que se formen estas lagunas se necesitan barreras que las separen del mar. El proceso clave en esta actividad es la deposición de carbonato cálcico. El dióxido de carbono en el aire reacciona continuamente con las rocas alcalinas de la superficie terrestre para formar bicarbonatos. Una reacción importante de este tipo es la que se produce entre rocas de silicato cálcico y el dióxido de carbono disuelto en el agua superficial. El producto final es una disolución de ácido silícico y bicarbonato cálcico que fluye con los ríos hacia el océano. En ausencia de vida los iones de calcio y bicarbonato pueden coexistir en un océano ligeramente ácido y el aporte continuo de ambos daría lugar, a la larga, a la cristalización espontánea de carbonato cálcico. Sin embargo, se trataría de una deposición más o menos aleatoria.

Los depósitos de caliza en el mundo real están relacionados en su mayor parte con la acción de los organismos vivos. La caliza no se deposita de forma aleatoria. La precipitación de carbonato cálcico por colonias de microorganismos tiene lugar de manera predominante en las aguas someras alrededor de los márgenes continentales donde la abundancia de nutrientes y bicarbonato cálcico es más alta. Sin ninguna planificación o previsión, los constituyentes de aquellas estructuras vivas, los estromatolitos calizos, se concentrarían en la costa y a la larga formarían lagunas en las que el agua de mar se evaporaría progresivamente depositándose sal. Al principio la formación de arrecifes sólo habría tenido un efecto local pero, a lo largo del tiempo, la mera presencia de la masa de caliza habría empezado a afectar la corteza deformable de la superficie terrestre hundiéndola, y aumentando así el tamaño de las lagunas. Siempre habría nuevos constructores de orca que colonizarían la superficie de un arrecife a medida que el terreno se hundiese, lo que tendería a mantener intacta la laguna.

A lo largo del tiempo ha ido incorporándose sal a los océanos desde la litosfera y eliminándose de nuevo. Una parte de esta sal se deposita en lechos evaporíticos y queda enterrada por los sedimentos. Estos depósitos pueden quedar temporalmente expuestos al aire de modo recurrente por los movimientos tectónicos y la meteorización, liberándose de nuevo los contenidos al mar. Sin embargo, también hay nuevas lagunas evaporíticas formándose continuamente. El balance de erosión y formación parece haber mantenido secuestrada en lechos evaporíticos una cantidad de sal suficiente para mantener los océanos con un bajo contenido de sal y aptos para la vida.

Durante el Proterozoico evolucionó un nuevo tipo de células, las que tienen núcleo, denominadas eucariotas,

El oxígeno abrió un hábitat nuevo para los organismos que pudieran sobrevivir en él y aprovecharlo. El primero de los organismos que conseguían energía combinando la materia orgánica con oxígeno habría coexistido pacíficamente con los fotosintetizadores

alimentándose de sus residuos y cadáveres. Luego aparecerían consumidores, organismos que aprendieron a comer alimentos frescos y que ingerían a los fotosintetizadores. El destino normal sería la digestión, pero a veces el organismo ingerido se convierte en un agresor, pudiendo derivar hacia una coexistencia pacífica beneficiosa para ambos. De esta manera los cloroplastos tienen como ancestros las cianobacterias arcaicas (proceso de endosimbiosis descrito por Lynn Margulis).

¿Cuál era la concentración de oxígeno del Proterozoico? ¿Permaneció alrededor del 0,1 al 1 por ciento o aumentó hasta los niveles actuales o incluso más?

El oxígeno libre tiene dos fuentes: la fuga de hidrógeno al espacio y la deposición de carbono y azufre. El secuestro de hidrógeno elemental por carbono o azufre siempre deja oxígeno libre detrás. Una vez que aparece oxígeno libre en el aire, la fuga de hidrógeno se reduce progresivamente. Es debido a que en una atmósfera de oxígeno sólo pueden existir trazas de hidrógeno o gases que lleven hidrógeno como el metano. La única excepción es el agua, que no puede oxidarse más, y queda confinada a la atmósfera inferior por las bajas temperaturas que existen en la base de la estratosfera donde queda congelada.

Una vez la fuga de hidrógeno se hizo insignificante, la única manera de introducir más oxígeno era separando carbono y azufre elemental del dióxido de carbono y los sulfatos. Cuando el carbono y azufre separados quedan enterrados en los sedimentos antes de que tengan oportunidad de reaccionar de nuevo con el oxígeno, se produce un incremento neto de este gas en el aire.

Este proceso de separación empieza con la fotosíntesis que divide el dióxido de carbono en carbono y oxígeno. Este penetra luego en el aire, y en las partes vivas y muertas de las plantas y bacterias. La mayor parte de este material carbonoso es oxidado por los consumidores pero un poco, cerca del 0,1 por ciento, queda enterrado de manera más o menos permanente. Una parte de carbono de los sedimentos interviene en la reducción de los sulfatos a sulfuros. La deposición de sulfuros también deja un incremento neto de oxígeno en el aire. El carbono y los sulfuros quedan incluidos en las arcillas y calizas sedimentarias. La sedimentación puede llevarse a cabo de manera que se formen combustibles fósiles, carbón y petróleo, aunque éstos sólo representan una pequeña proporción del carbono total y del azufre de los sedimentos.

La tasa de deposición de carbono ha sido constante a lo largo de la historia de la vida en la Tierra; hay muy poca diferencia entre el Arcaico y ahora. El misterio puede resolverse debido a que si sólo había trazas de oxígeno, la proporción de consumidores aeróbicos sería menor que ahora. Es decir, los metanógenos y otros organismos anaeróbicos digerían casi todos los productos fotosintéticos y dejaban en los sedimentos la misma cantidad de carbono que ahora. En parte, la elevada tasa actual de fotosíntesis se debe seguramente al reciclado rápido de carbono por los consumidores que respiran oxígeno. En el Proterozoico había consumidores que se alimentaban de materia orgánica y utilizaban el oxígeno para metabolizarla.

La cuestión clave es que la producción de oxígeno viene determinada por la cantidad de carbono depositado y esto a su vez depende de la cantidad de productos de los fotosintetizadores que llegan al sector anóxico. Si los consumidores devorasen toda la materia orgánica no quedaría ninguna para ser enterrada, y por tanto, no habría fuente

de oxígeno. La tasa de deposición de carbono ha sido más o menos constante entonces la conclusión es que el aporte de oxígeno de esta fuente también ha sido constante. En el Arcaico todo este oxígeno se gastaba en oxidar las sustancias reducidas presentes en el ambiente y las introducidas en el mismo.

Pero cuando se empezó a disponer de oxígeno libre, los consumidores comenzaron a utilizar una proporción creciente del mismo. La permanencia de ecosistemas anóxico en el Arcaico aseguraba el enterramiento continuo de carbono y un aporte continuo de oxígeno al aire. ¿Qué es lo que determinaba el nivel de oxígeno en el aire? Desde el punto de vista de la geofisiología podemos suponer que la toxicidad inherente al oxígeno no fue totalmente vencida por los sistemas antioxidantes y por las enzimas de los organismos del sector aeróbico. En estas circunstancias el oxígeno mismo podría haber establecido su propio límite inferior y un límite superior para la mayoría de los seres vivos.

El ciclo de oxígeno no puede desconectarse del ciclo del dióxido de carbono; una subida del oxígeno implica una caída del dióxido de carbono. Por otra parte, el ciclo del dióxido de carbono está acoplado con el clima, y éste a su vez afecta tanto al crecimiento de los consumidores como de los productores. El bucle de realimentación entre dióxido de carbono y clima estabilizaría el sistema de forma adicional. Una vez superada la crisis de oxígeno el Proterozoico pudo ser un tiempo confortable para Gaia. El nivel natural de dióxido de carbono habría proporcionado un clima agradable y no se necesitaría un gran esfuerzo para regularlo.

Durante el Proterozoico continuó la lluvia constante de asteroides. Aparte de numerosos objetos pequeños hubo por lo menos diez que causaron daños a Gaia. La capacidad de recuperación tras perturbaciones grandes es una prueba de la salud de los sistemas geofisiológicos. El hecho de que la vida haya persistido y se haya recuperado de tantas de estas catástrofes proporciona todavía más evidencia de la existencia de un sistema homeostático poderoso en la Tierra.

TIEMPO MODERNO

La llegada de grandes comunidades de células de cuerpo blando alteró la superficie de la Tierra y el ritmo de vida en ella: plantas que podían permanecer de pie sostenidas por estructuras de raíces profundas en el suelo, consumidores que podían trasladarse por el suelo y también por el aire o el mar. Su presencia marca el período denominado Fanerozoico, que abarca desde el Cámbrico, hace unos 600 millones de años, hasta la época actual.

Si consideramos que Gaia es un organismo vivo, el Fanerozoico se puede considerar como el estado más reciente de su vida, en el que todavía se encuentra. Los geólogos indican que la transición del Proterozoico al Fanerozoico ocurrió hace unos 570 millones de años.

Centrémonos en el oxígeno. Este gas proviene de la utilización de la energía solar por los cloroplastos verdes dentro de las células para convertir dióxido de carbono y agua en oxígeno libre y productos químicos. La mayor parte del oxígeno es usada de nuevo por los consumidores, que comen las plantas y las algas, oxidan el alimento y devuelven el dióxido de carbono al aire y al mar. Es necesario un equilibrio porque la supervivencia

de plantas y algas se vería amenazada sin los consumidores. En la atmósfera sólo hay reserva de dióxido de carbono para unos pocos años. La desaparición de los consumidores sería desastrosa para las plantas. No sólo se acabaría el dióxido de carbono para la fotosíntesis, sino que habría cambios climáticos muy importantes. No menos importante, el reciclado de nutrientes y la regeneración del suelo desaparecerían.

El oxígeno también se gasta en reacciones con gases como los sulfurosos emitidos por los volcanes, o las especies químicas reductoras de las rocas ígneas que solidifican a partir del magma que emerge a través de la corteza oceánica. El oxígeno se mantiene a un nivel constante debido a la sedimentación de una pequeña proporción de carbono fotosintético, cerca del 0,1 %, justo lo necesario para equilibrar las pérdidas. Se sabe que el nivel de oxígeno debe de haber cambiado al final del Proterozoico debido a las nuevas formas de vida que aparecieron.

Cuando los organismos vivían principalmente en el agua o en la superficie terrestre, el límite máximo de concentración de oxígeno estaría determinado por su toxicidad. En semejantes ecosistemas los incendios eran un problema menor. Dichos ecosistemas podría haber tolerado una atmósfera que contuviera hasta el 40 % de oxígeno, siempre que la presión atmosférica suplementaria no acelerase el efecto invernadero para dar lugar a un clima demasiado caliente.

Sin embargo, los eucariotas nadadores que aparecieron en el Proterozoico temprano no necesitarían mucho oxígeno, ya que el gas podría difundirse fácilmente a través del pequeño espesor de las paredes de sus microscópicas células; una cantidad tan pequeña como el 0,1 % habría sido suficiente. Los organismos más grandes que aparecieron en el Fanerozoico, tales como los dinosaurios, que estaban formados por volúmenes masivos de células en yuxtaposición, sólo podrían haber existido en un ambiente más rico en oxígeno.

Tiene que haber un límite superior para la concentración de oxígenos a la que estos animales pueden vivir debido a los efectos tóxicos de este gas.

¿Por qué aumentó el nivel de oxígeno? Al final del Arcaico el aporte de especies químicas reductoras (sulfuros e ión ferroso) de la Tierra primitiva fue insuficiente para compensar el flujo de oxígeno proveniente de la deposición de carbono, y el oxígeno aumentó. En el Proterozoico temprano se llegó a un estado estacionario a baja concentración. Este nivel provenía de un balance entre las necesidades de los consumidores y la toxicidad del oxígeno para los fotosintetizadores primitivos. No existe una transición tan claramente definida en el Proterozoico como la que corresponde a la aparición del oxígeno hacia el final del Arcaico. No se sabe por qué empezó a subir de nuevo el nivel de oxígeno, aunque Robert Garrels propone que ello se encuentra asociado con el desarrollo de bacterias que reducen el sulfato. Ello hubiera dado lugar a la deposición de una parte mayor de los materiales producidos por los fotosintetizadores en forma de azufre o sulfuros, dejando detrás un exceso de oxígeno en el aire. Las reacciones de este oxígeno libre con otros elementos tales como el carbono y el azufre liberarían ácidos a la atmósfera lo que aumentaría la erosión de las rocas de la corteza y liberaría más nutrientes, dando lugar a una mayor abundancia de organismos vivientes. Esta retroalimentación positiva sobre el aumento de oxígeno continuaría hasta que las desventajas de su presencia superasen a los efectos beneficiosos.

En algún momento de este periodo los organismos empezaron a sintetizar a gran escala los precursores de ligninas y ácidos húmicos. Debido a las propiedades de la lignina daría lugar a un incremento de la tasa de acumulación de carbono si se sintetiza en grandes cantidades, y con ello también aumentaría la tasa de producción de oxígeno.

El oxígeno ha permanecido en una concentración constante del 21 % en volumen durante todo el Fanerozoico. Esta constancia se encuentra en las capas sedimentarias que contienen carbón vegetal. La presencia de carbón vegetal implica fuego, probablemente incendios forestales. Estos indican límites muy definidos para la cantidad de oxígeno atmosférico. Andrew Watson mostró que los incendios no pueden empezar, ni siquiera en zonas secas, cuando el oxígeno se encuentra por debajo del 15 %. Por encima del 25 % los incendios son tan intensos que incluso la madera húmeda de las selvas tropicales se quemaría en una conflagración espantosa. El oxígeno se encuentra en una concentración del 21 %, cerca del punto medio entre estos límites.

Podría ser que los mismos incendios regulasen el oxígeno. No hay escasez de rayos para dar lugar a su ignición. Si los incendios son los reguladores no puede tratarse de una relación simple. El oxígeno del aire proviene de la acumulación del carbono. Los consumidores son eficientes y sólo el 2 % del carbono fotosintetizado alcanza los sedimentos, de donde un 95 % se devuelve al ambiente oxidante en forma de metano. Así, sólo una parte de cada mil del carbono fijado por las plantas queda enterrado en las profundidades. Por otra parte, la combustión es ineficaz. Por tanto los incendios pueden dar lugar a la acumulación de mucho más carbono porque el carbón vegetal es totalmente resistente a la degradación microbiana. Podría existir un efecto de retroalimentación positivo para la acumulación de oxígeno, pero éste pronto daría lugar a tal devastación de las selvas que la producción de carbono caería hasta el punto en que el oxígeno se encontraría cerca o por debajo del nivel actual. Entonces se repetiría el ciclo. Las capas de carbón vegetal que se encuentran en los sedimentos sugieren la existencia de incendios recurrentes, pero la proporción de carbono acumulado que existe en forma de carbón vegetal es pequeña para justificar la existencia de este ciclo.

Una regulación más sutil en relación con el fuego consistiría en la utilización del fuego por algunas especies de árboles como arma para mantener su posición del territorio. La precisa regulación del fuego para dar lugar a un nivel de oxígeno tan conveniente como el 21 % sugiero que en ello juegan un papel crucial partes importantes de las plantas, inflamables o no, que son las víctimas y los beneficiarios del proceso.

El dióxido de carbono se encuentra ahora a sólo 340 ppm en volumen. La Tierra primitiva tenía probablemente 1000 veces más dióxido de carbono. A medida que el Sol se calentaba ocurrían dos procesos: el incremento en la tasa de evaporación de agua de mar y, por tanto, de lluvia y un incremento de la tasa de reacción de dióxido de carbono con las rocas. Actuando de manera conjunta incrementarían la tasa de erosión de las rocas y así disminuiría el dióxido de carbono. Habría una retroalimentación negativa en el aumento de la temperatura en la medida que aumentase el calor procedente del Sol. Pero este modelo no puede explicar los hechos. El dióxido de carbono precedido para la época presente sería 100 veces superior.

Este modelo, no obstante puede ser factible si se incluyen en él los organismos vivientes. En cualquier punto de la Tierra en que se examine el suelo de una región bien

cubierta por la vegetación, el contenido en dióxido de carbono es del orden de 10 a 40 veces superior al que se encuentra en la atmósfera. Lo que ocurre es que los organismos apartan el dióxido de carbono del aire y lo conducen a las partes profundas del suelo donde puede reaccionar con las partículas de las rocas y ser eliminado. El dióxido de carbono entra en contacto con las rocas de silicato cálcico y reacciona con las mismas para formar carbonato cálcico y ácido silícico. Estos productos se disuelven en el agua subterránea y entran a formar parte de las corrientes y los ríos, incorporándose al mar.

En el mar, los organismos marinos continúan el proceso de incorporación a los sedimentos secuestrando el ácido silícico y el bicarbonato cálcico para formar sus conchas. Los productos de la erosión de las rocas (caliza sedimentaria y sílice) son enterrados en el fondo del mar e incorporados al magma por el movimiento tectónico de placas. Si no hubiese vida el CO₂ de la atmósfera tendría que interaccionar con el silicato cálcico de las rocas mediante procesos inorgánicos CO₂ que ahora se observa, la concentración de este gas tendría que ser mucho mayor, quizá del orden del 3 %.

Luego ya se tiene una explicación de la baja concentración de dióxido de carbono en la atmósfera actual. Sin embargo, a medida que el Sol se torna más caliente, este mecanismo tiene pocas posibilidades de mantener el planeta frío. Hay una relación inversa entre la abundancia de dióxido de carbono y abundancia de vegetación.

Hay que destacar que en el Mioceno, hace unos 10 millones de años, se desarrolló un tipo nuevo de planta capaz de crecer a concentraciones de dióxido de carbono más bajas. Estas plantas nuevas sustituirán a las anteriores y serán capaces de desarrollarse incluso a concentraciones más bajas del dióxido de carbono para compensar el calor creciente del Sol. Sin embargo, ello será una solución temporal, porque si asumimos que la situación actual se mantendrá en el futuro, en un tiempo tan corto como dentro de 100 millones de años, el Sol se habrá calentado lo suficiente como para que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera tenga que ser nula para mantener la temperatura media actual. También podría suceder que evolucionara un ecosistema que se encontrase cómodo a una temperatura media de hasta 40° C. La crisis del dióxido de carbono es importante, pero no necesariamente tiene que amenazar la vida de Gaia.

Según el autor, si en cuanto a que la época glacial es el estado preferido de Gaia, entonces los periodos interglaciares como el presente representan un fallo temporal de regulación. ¿Cómo se ha llegado a él?

Es conocido que los sistemas activos de regulación o control exhiben inestabilidades cuando llegan al límite de su rango operacional.

Aún no se conoce la causa de las glaciaciones, aunque se sabe que es un fenómeno periódico con pequeñas oscilaciones en la cantidad de radiación solar que llega a la Tierra y con las variaciones a largo plazo de la inclinación y la órbita de la Tierra. Esta relación astrofísica entre glaciación y órbita e inclinación de la Tierra fue propuesta por Milutin Milankovich.

La geofisiología sugiere que, para regular el clima frente a un incremento creciente en el calor del Sol, los glaciares son el estado normal y los interglaciares, como el presente, los patológicos.

Un mundo semejante es inherentemente inestable. Si una tendencia al calentamiento, como el efecto Milankovich, diera lugar a una disminución de zonas terrestres, el efecto combinado del incremento del dióxido de carbono junto con el efecto geofísico retroactivo de una disminución en el área de reflexión constituida por la cubierta de hielo y de nieve daría lugar a un incremento acelerado de la temperatura y del dióxido de carbono. El sistema también sería inestable desde un punto de vista biológico.

La circularidad de las descripciones de los sistemas de control fisiológico dificultan la elección de un punto de partida. ¿Qué fue primero, el nivel bajo de dióxido de carbono y la cubierta de nubes densas o la baja temperatura?

En un organismo vivo se utiliza ampliamente el azufre tanto de forma estructural como funcional. El ciclo natural del azufre requiere la emisión desde los océanos de grandes cantidades de sulfuro de hidrógeno para compensar las pérdidas de azufre, en forma de ión sulfato, generadas por el lavado de los ríos. Sin ningún tipo de retorno de azufre, los organismos terrestres pronto habrían agotado este elemento esencial.

Los lugares propuestos para la regulación de la masa de nubes por emisiones de azufre son las áreas desiertas de los océanos tropicales, el 40 % del área de la superficie de la Tierra. Son de productividad baja en comparación con las plataformas continentales y las aguas continentales. Casi se encuentran carentes de vida, como los grandes desiertos terrestres que se extienden a 30° de latitud norte y sur del ecuador.

Las algas que se encuentran en la superficie de estos océanos desérticos no producen los precursores de los núcleos de condensación de nubes para beneficio nuestro ni como parte de un gran diseño para mantener frío el planeta. El proceso debe tener sus orígenes en los efectos ambientales locales de la bioquímica algal.

La concentración de sal en el mar, como ya se ha mencionado es alta para los organismos vivos. Para los organismos unicelulares o los pequeños organismos flotantes, incapaces de regular su salinidad interna, la síntesis de las betaínas puede haber consistido en el medio más energético, de conseguir un medio interno bajo en sal. De nuevo, la elección natural hubiera tenido que ser el propionato de dimetilsulfonio, porque el azufre es abundante mientras que el nitrógeno es escaso. El propionato de dimetilsulfonio permanece en las células de las algas durante toda su vida, pero cuando mueren o son ingeridas se dispersa en el océano donde se descompone para dar lugar a sulfuro de dimetilo. Este gas es oxidado rápidamente en el aire por los ubicuos radicales hidroxilo hasta que casi todo él se convierte en ácido sulfúrico y metanosulfúrico. Los vapores de estos ácidos son transportados junto con los movimientos del aire hasta que alcanzan las alturas supersaturadas con vapor de agua, donde actúan como núcleos de condensación de nubes.

La fuga de sulfuro de dimetilo al aire podría reportar beneficios inesperados para las algas. La cubierta adicional de nubes debida a la presencia de núcleos de ácido sulfúrico altera el clima local.

Los océanos se vuelven más salados cuando el agua se congela en los casquetes polares, lo que puede dar lugar a un incremento en la emisión de sulfuro de dimetilo, y de nubosidad, y así a una retroalimentación positiva hacia más enfriamiento. Puede ocurrir

que la gran biomasa asociada con las glaciaciones proporcione más nutrientes a la vida oceánica y así permita el mantenimiento de más algas.

EL MEDIO AMBIENTE CONTEMPORÁNEO

Desde el punto de vista gaiano la evolución del medio ambiente esta caracterizada por periodos de estabilidad interrumpidos por inesperados cambios abruptos. El medio ambiente nunca ha sido tan inhóspito como para amenazar la existencia de la vida en la Tierra, pero durante estos cambios bruscos las especies residentes sufrieron catástrofes de escala enorme. Nosotros mismos hemos sido un producto de esta catástrofe.

• DE NUEVO, EL DIÓXIDO DE CARBONO

El dióxido de carbono ha desempeñado un papel contradictorio en la Tierra. Es el alimento para la fotosíntesis y por tanto para toda la vida, el medio mediante el cual la energía de la luz solar se transforma en materia viva. Ha servido para mantener la Tierra caliente cuando el Sol era frío, una protección que, ahora que el Sol es caliente, se está haciendo delgada. Sin embargo, también es nuestro sustento. El biota en todas las partes del mar y de la tierra trabaja para bombear dióxido de carbono del aire de manera que el dióxido de carbono que emerge de los volcanes no nos ahogue. Sin este bombeo constante, este gas aumentaría su concentración en unos centenares de miles de años hasta niveles que harían de la Tierra un sitio inhóspito para la vida.

Para los humanos, unos cuantos de cientos de miles de años es algo casi indistinguible del infinito. Gaia tiene razones para preocuparse por este descenso a largo plazo de dióxido de carbono. Ahora bien, el incremento de dióxido de carbono como consecuencia de la combustión de productos fósiles solamente es para ella una perturbación menor que dura sólo un instante. Ella tiende a compensar la disminución.

La humanidad puede haber elegido un momento muy inconveniente para añadir dióxido de carbono al aire. Lovelock piensa que el sistema de regulación del dióxido de carbono está cerca del final de su capacidad estabilizadora. El aire de los tiempos recientes ha tenido una concentración inadecuadamente baja en dióxido de carbono para la mayor parte de la vegetación. Están evolucionando nuevas especies con una bioquímica diferente. Estas especies nuevas, las plantas C4 pueden vivir con niveles muy bajos de dióxido de carbono y dentro de un tiempo pueden que reemplacen a los modelos C3 viejos. Sabemos que el dióxido de carbono ha disminuido su concentración a lo largo de la historia de la Tierra, pero subió desde 180 a cerca de 300 ppm en unos cientos de años al final de la última glaciación. Una subida rápida como ésta sólo puede haber sido originada por un fallo en el bombeo.

La velocidad y la proporción de la subida del dióxido de carbono resultado de nuestras actuaciones, es comparable con la del incremento natural de finales de la última Edad del Hielo. Parece ser que en algún momento del siglo que viene el incremento será probablemente igual al causado por el fracaso de las bombas hace 12.000 años. Por tanto, el cambio climático sobre el que tenemos que pensar es posiblemente tan importante como el ocurrido entre la última Edad de Hielo y ahora. Un cambio que transformaría el invierno en primavera, la primavera en verano y el verano en algo habitualmente tan caliente como el verano más caliente del que podamos acordarnos.

Quizá si la dejásemos a su aire Gaia podría absorber el exceso de calor y dióxido de carbono que le llega. Sin embargo, no se deja a Gaia actuar por sí sola; además de los incrementos de dióxido de carbono también estamos eliminando una parte de la vida vegetal, las selvas y los bosques, que mediante una respuesta de crecimiento extra podrían contrarrestar el cambio.

Las consecuencias de la distorsión de un sistema que está balanceado precariamente, en los límites de su estabilidad son probablemente mucho más importantes que los efectos directos y predecibles de la adición de dióxido de carbono un sistema estable. Tanto la teoría de control como la geofisiología nos indican que la perturbación de un sistema que se encuentra cerca de una inestabilidad puede dar lugar a oscilaciones, cambios caóticos o colapso.

- **ACIDEZ**

El efecto invernadero del CO₂ no es el único problema consecuente de la combustión de productos fósiles. En las regiones templadas del hemisferio norte existe un incremento de la mortalidad y morbilidad de los ecosistemas. Los árboles y la vida de los lagos y ríos se encuentran particularmente afectados, relacionados con el incremento de las precipitaciones ácidas y dado el daño que hace a los ecosistemas forestales.

Se podría decir que la culpa es del oxígeno, pues si no existiese no habría óxidos de nitrógeno ni de azufre y por tanto no habría lluvia ácida. Mucho antes de que los seres humanos existiesen la lluvia que caía era ácida. La acidez natural era debida al ácido carbónico, ácido fórmico, ácido nítrico, sulfúrico, metanosulfúrico y clorhídrico. Pero la lluvia que caía no causaba daño porque se encontraban muy diluidos. Básicamente estaban producidos a partir de la oxidación de los gases emitidos por los seres vivos.

De nuevo, la contaminación por lluvia ácida es un problema de dosis: la polución se produce debido a un incremento hasta niveles intolerables de ácidos que antes estaban a concentración benigna.

La fuente menospreciada de ácido es el transportador natural de azufre, el sulfuro de dimetilo. La emisión de este gas por parte de floraciones fitoplanctónicas en la superficie de los océanos alrededor de Europa occidental es tan grande que puede ser comparada con la emisiones totales de azufre por la industria de esta región.

¿Por qué no se ha observado contaminación hasta ahora? La industrialización no sólo ha incrementado la carga total de ácido sino que también ha aumentado la abundancia de óxidos de nitrógeno y otras especies químicas provenientes de la combustión. Estas pueden reaccionar bajo la luz del Sol y producir hidroxilos, un potente oxidante. La fuente más importante de estos productos es la máquina de combustión interna de los automóviles. Debido a ello, el sulfuro de dimetilo que se solía oxidar lentamente sobre toda Europa puede ahora verter su carga ácida rápidamente en las regiones cercanas a la costa en que el aire del mar se encuentra con el aire contaminado.

Por otro lado, las floraciones de algas emiten sulfuro de dimetilo, aparentemente estimuladas por los aportes ricos en nutrientes provenientes de los ríos de Europa.

- **EL SOL**

Para Gaia, el hecho más importante en relación con el sol, además de su aportación de energía, es la geometría de sus rayos. Alrededor de un 90 % de los rayos que iluminan nuestro entorno viaja con una alineación paralela casi perfecta. Un 10 % es difusa, desperdigada en todas las direcciones por las moléculas del cielo. Pero ese 10 % es crucial: es lo que da al cielo su color azul. En la frontera superior de Gaia toda la luz es directa y sus rayos prácticamente paralelos.

Las líneas paralelas de luz que viajan a través del espacio se abaten sobre una esfera un tanto oscura, sólida que refleja alrededor de un 30 % de la luz. Esta circunstancia, determina la geometría fundamental de Gaia.

Las moléculas de aire caliente se mueven más deprisa que las de aire frío. Allá donde el calor y el frío se ponen en contacto, la diferencia genera un transporte de energía: el viento. El viento es fruto de las diferencias de presión, que a su vez son causadas fundamentalmente por diferencias de temperatura entre la superficie de la Tierra y el aire. A escala planetaria, el patrón dominante de calentamiento diferencial tiene su origen en los rayos paralelos del sol que caen sobre la esfera terrestre.

Como el calor es bombeado continuamente de las latitudes bajas a las altas, podemos asumir que de no existir este bombeo, los trópicos serían aún más calientes y los polos más fríos. Sin las turbulencias, las diferencias de temperatura entre los trópicos y las latitudes elevadas se multiplicarían por tres o cuatro, lo que harían un planeta para la vida hoy día inhóspito.

• **LOS VOLCANES**

Gaia posee dos superficies que podrían llamarse su lado dorsal y su lado ventral. La superficie dorsal da al espacio, negro y vacío salvo por el sol. La superficie ventral se aprieta contra roca sólida interrumpida de vez en cuando por los volcanes.

Los límites de Gaia no son ni tan funcionalmente discretos ni tan claros en el espacio como los de los organismos. En el borde exterior, hacia el espacio, el aire se desvanece hasta el vacío. La densidad molecular va disminuyendo al aumentar la altitud, y esto ocurre bastante uniformemente en todos los radios que se alejan del centro gravitatorio. A través de este borde difuso se produce escaso intercambio de material, salvo por algunos átomos de hidrógeno y las sondas espaciales y algunos meteoritos y algo de polvo espacial que entran. El flujo de energía es otra cosa, del mismo modo que penetra una cantidad gigantesca de energía solar, sale una cantidad similar de rayos infrarrojos.

La frontera inferior es menos nítida ya que las aguas terrestres penetran en las grietas y los poros de la roca profunda. Las bacterias pueden vivir a kilómetros por debajo de la superficie terrestre, incluso en los poros de la roca.

El calor del interior del planeta presenta un gran poder. El calor que se eleva desde los volcanes puede remover la tierra, aparentemente sólida.

Allá donde puede penetrar en el sistema de Gaia y salir hacia el espacio, el calor interior procedente de los minerales radiactivos dispersos en las profundidades ha de difundirse hacia arriba a través del manto, hasta y a través de la corteza. Los gruesos continentes,

como aislantes térmicos, retardan el flujo y por tanto establecen diferenciales de temperaturas laterales.

El suministro de materiales procedentes del interior sería inadecuado para los ciclos del carbono o del nitrógeno gaianos de hoy en día porque estos elementos tienen tasas de reciclaje globales del orden de varios cientos o más. Pero los elementos que Vulcano arroja a la superficie en abundancia tienen tasas de reciclaje muy inferiores. Con un abastecimiento más que suficiente por parte de Vulcano, el estrecho reciclaje de ciertos elementos simplemente no es necesario para los biotas de hoy en día.

No habría bastado con que Vulcano se hubiera limitado a aportar una fuente inicial de alimentos rocosos en los comienzos de la Tierra y de la vida. La roca ha de ser renovada, las montañas rejuvenecidas, los sedimentos de las plataformas continentales elevados a las secas alturas y volteados. Las convulsiones de Vulcano exponen nuevas superficies para los pequeños pero cruciales flujos de minerales esenciales para las biotas globales.

El calor de Vulcano, que empuja los diversos aportes de material a lo largo y ancho de la superficie ventral de Gaia, crea también, en última instancia, los hábitat de la vida

• **LA SITUACIÓN ACTUAL**

Aplicando algunos conceptos sobre tumores a la Teoría de la Biosfera propuesta sería posible entender algunos de los efectos de la civilización en el planeta. Un tumor presenta las características siguientes.

- Crece desproporcionadamente
- Consume enormes recursos del organismo
- Genera gran cantidad de toxinas
- Traba de sobrevivir al margen del organismo

Los seres humanos crecen en un número incontrolado y son capaces de destruir lo que se pone en contacto con ellos. La vida existe en formas muy diversas y entre ellas ni los organismos unicelulares ni Gaia padecen esta forma única de rebelión que es el cáncer. Este problema se encuentra circunscrito a los metafitos y metazoos, aquellas formas de vida, que consisten en grandes comunidades celulares altamente organizadas. El crecimiento maligno en un animal requiere la transformación de la información génica. Así, los descendientes de la célula transformada crecen de forma independiente del sistema animal. Sin embargo, la independencia nunca es completa; incluso las células cancerosas responden y contribuyen hasta cierto punto al sistema. Para ser como el cáncer primero necesitaríamos convertirnos en una especie diferente y luego constituir una parte de algo mucho más organizado que Gaia.

La longevidad y la fuerza de Gaia proviene del grado de informalidad de la asociación de los ecosistemas y especies que la constituyen. Durante un tercio de su vida trabajó estando poblado únicamente de bacterias procariotas y todavía funciona debido principalmente a la acción de éstas, el sector más primitivo de la vida terrestre. Las consecuencias para Gaia de los cambios ambientales que hemos provocado no son nada en comparación con lo que el ser humano puede experimentar debido al crecimiento descontrolado de una comunidad de células malignas. Aunque Gaia puede ser inmune a las excentricidades de alguna especie como nosotros o los productores de oxígeno, ello

no implica que nosotros como especie estemos protegidos contra nuestra locura colectiva.

Las enfermedades de Gaia no duran mucho respecto a su lapso de tiempo. Cualquier cosa que hace el mundo incómodo para vivir tiende a inducir la evolución de aquellas especies que pueden conseguir un medio ambiente nuevo y más hospitalario. Si el mundo se hace poco habitable por nuestra causa, existe la posibilidad de un cambio a otro régimen que será mejor para la vida, pero no necesariamente mejor para nosotros.

Las cosas que le hacemos al planeta no son dañinas ni plantean una amenaza geofisiológica a no ser que las hagamos a gran escala. Si sólo fuésemos unos 500 millones de personas los que viviésemos en la Tierra casi nada de lo que hacemos ahora al medio ambiente perturbaría Gaia.

Para nosotros no hay supervivencia sin agricultura, pero parece que hay una diferencia enorme entre buena y mala agricultura. Al autor le parece que este es el cambio geofisiológico mayor y más irreversible que hemos provocado. ¿Sería posible utilizar la tierra para alimentarnos y también mantener su papel climático y geofisiológico? ¿Podrían los árboles proporcionarnos nuestras necesidades y también servir para mantener los trópicos húmedos de lluvia? ¿Se podría bombear con nuestros cultivos el dióxido de carbono de forma parecida a los ecosistemas que sustituyen? Tendría que ser posible pero no sin un cambio drástico de sensibilidad y actitudes.

Hay muchas maneras de mantenerse en contacto con Gaia. Los seres humanos individuales son colectivos celulares y endosimbióticos densamente poblados, aunque también constituyen entidades diferenciadas. Los individuos interactúan con Gaia en el reciclado de los elementos y en el control del clima del mismo modo que la célula también lo hace en el cuerpo. Se puede interactuar individualmente de un modo espiritual mediante una sensación de maravilla del mundo natural y sintiéndose una parte de él. De alguna manera esta interacción no es diferente del estrecho acoplamiento entre el estado de la mente y el cuerpo. Otra conexión se realiza a través de las potentes infraestructuras de las comunidades humanas y de transporte de masas. Como especie movemos ahora una masa mayor de algunos materiales alrededor de la Tierra que la cantidad movilizaba por todo el biota de Gaia antes de que apareciésemos.

Una mal interpretación frecuente de la idea de Gaia es el paladín de la complacencia, que proclama que los efectos de la retroalimentación siempre protegerán al medio ambiente de cualquier daño serio que pueda causar el hombre. La verdad es casi diametralmente opuesta. Gaia es severa y ruda, siempre manteniendo el mundo cálido y habitable para aquéllos que obedecen las reglas, pero despiadada en la destrucción de los que las transgreden. Su objetivo inconsciente es un planeta adaptado para la vida. Si la humanidad sigue en el camino actual, será eliminada sin ninguna piedad.

• **LOS MICROBIOS Y EL NITRÓGENO GLOBAL**

Para entender el nitrógeno atmosférico, lo mejor es empezar por el océano. ¿Qué explica la riqueza de fitoplancton? Como en todas las aguas marinas, hay abundancia de dióxido de carbono en forma ión bicarbonato. De eso no hay escasez. La vida oceánica se ve habitualmente limitada por los nutrientes disueltos, como los fosfatos y los nitratos.

Los peces suelen prosperar en las regiones costeras. Los oceanógrafos hablan de “aguas verdes” en contraste con las aguas relativamente desérticas del océano abierto, las “aguas azules”. El batimiento a lo largo de las costas, en las que los mares se juntan con los continentes, mantiene la mezcla de nutrientes desde el fondo. Las aguas emergentes van cargadas de nutrientes. En sólo unas pocas décimas de un porcentaje del área oceánica de la Tierra, estas regiones costeras con surgencias de aguas profundas producen la mitad de las capturas pesqueras.

Con el arrastre las redes pueden acumular una sustancia molesta que recibe el nombre de estopa, un microorganismo denominado *Thioploca*. Se vuelve visible al crear colonias en forma de enormes filamentos compuestos por miles de células. Los filamentos se agrupan en manojos de hasta un centenar, recubiertos por una gruesa vaina de mucílago.

El misterio que encierran estos tapetes de microbios es cómo consiguen ser tan productivos en aguas casi desprovistas de oxígeno. Comprender esto requiere una revisión del ciclo del carbono en el mar.

En lugar de suelo oscuro bajo las plantas el océano tiene agua oscura bajo la zona bien iluminada. En ésta, la llamada zona fótica, viven diversas especies de algas. Debido al crecimiento de este fitoplancton, de los organismos que se alimentan de él, de los que se alimentan de éstos y así sucesivamente, cae una lluvia de detritus hacia la oscuridad de las profundidades. Para las bacterias y otras criaturas, esta lluvia de materia orgánica es irresistible y, mediante su respiración, gastan parte del oxígeno del agua.

Algunos microbios del cieno abren camino al metabolismo sin oxígeno de la comunidad. Usan un sustituto del oxígeno, el ión sulfato, uno de los iones disueltos más abundantes en el océano y se difunde junto con el agua hasta los estrechos espacios intersticiales de los sedimentos. Aunque el oxígeno no esté disponible como gas disuelto en su forma estándar de dos átomos de oxígeno, el oxígeno como elemento está presente en el sulfato.

Con este oxígeno, los reductores de sulfatos se alimentan de los detritus ricos en carbono, excretando dióxido de carbono como producto de desecho. El azufre liberado se combina con el ión hidrógeno presente como complemento ácido en el sulfato. El sulfuro de hidrógeno resultante es un gas de desecho para los microbios, y es excretado. Otro ión con capacidad de liberar la energía del sulfuro de hidrógeno se difunde con el agua en los sedimentos negros, pero este ión, el nitrato, es mil veces menos abundante que el sulfato.

Así pues, los microbios reductores de sulfato de la capa negra toman iones disueltos de hidrógeno y sulfato, les añaden carbono de los detritus y expulsan los gases dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. Todo está en orden, es decir, salvo por los átomos de nitrógeno de las moléculas de nitrato. ¿Qué pasa con ellos? Aún no se sabe. El nitrógeno podría ser excretado bien en forma de iones amonio

¿Qué tienen que ver con Gaia todos estos detalles sobre el ciclo del nitrógeno? La fabulosa acción de bombeo unidireccional del cuerpo incorpora oxígeno y expulsa dióxido de carbono y oxígeno, pero Gaia hace algo más que bombear: recicla.

LAS PARTES DE GAIA

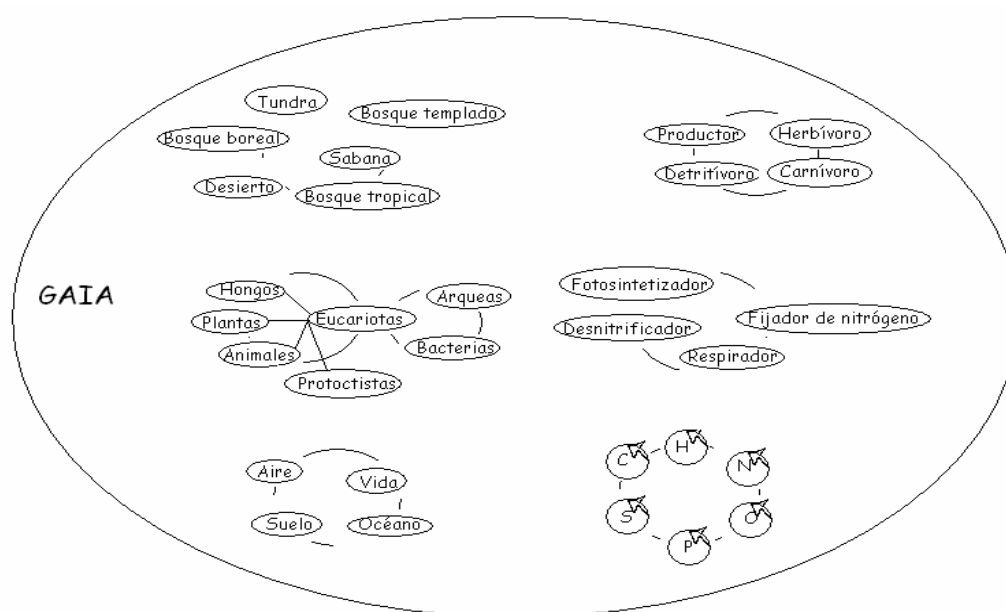
Las partes de Gaia podrían ser los ecosistemas de mayor escala: los biomas. Los biomas se extienden por todo el planeta: bosques húmedos tropicales, sabanas, desiertos, pastizales y bosques de latitudes templadas, bosques boreales, tundra.

Los biomas son también marcadores pobres de las funciones de la vida a escala planetaria. Todos los biomas parecen desempeñar todas las funciones que después se suman a escala global. Uno y otro bioma pueden desequilibrarse respecto a determinados ciclos y, por tanto dependen del todo para amortiguar sus limitaciones, pero todos ellos contienen el aparato esencial para reciclar los nutrientes. Lo que es más, todos los biomas respiran la misma atmósfera. El viento y el agua pueden dispersar semillas y bacterias a grandes distancias. El ecosistema más genuino en términos de una sola unidad vinculada es, por consiguiente, la propia Gaia.

Una clasificación describe cinco grandes “reinos”: animales, plantas, hongos, protoctistas y bacterias. Una avalancha de nuevos descubrimientos ha generado una clasificación aún más amplia que la de los reinos: los dominios. ¿Debería considerarse que los dominios son las partes de Gaia?

Globalmente, es difícil defender que los tres dominios constituyan categorías útiles para comprender la persistencia de Gaia. Existe gran diversidad bioquímica en cada dominio, y los dominios se solapan de modos muy significativos. Aunque tanto los dominios como los reinos son estructuras profundas del genoma colectivo de la biosfera, los solapamientos funcionales parecen debilitar todo razonamiento a favor de considerar que los agrupamientos, en cualquiera de los dos niveles, sean las partes de Gaia.

Otro enfoque se basa en los cuatro componentes primarios: vida, suelo, atmósfera y océano. Otra posibilidad es considerar que los propios ciclos son las partes de Gaia.



Puntos de vista sobre las partes de Gaia. Biomas, asociaciones tróficas, gremios bioquímicos, ciclos, sustancias primarias, dominios genéticos y reinos eucarióticos. Puede que la mejor perspectiva de todas sea concebir las perspectivas mismas como partes de un todo.

Lovelock sugirió que las partes de Gaia son los grandes conjuntos de organismos que desempeñan determinados tipos de actividades químicas en el funcionamiento global.

- **COMPONENTES PRIMARIOS**

Los ciclos y los gremios bioquímicos son, a modo de ver del autor, dos de las mejores maneras de compartimentar Gaia. Pero existe otro estrato más, una división basada en los componentes primarios.

La vida es el componente central del principal enfoque de la investigación gaiana. En tierra firme, cuando se desvanece y es transformada en otro tipo de elemento primario, la vida no puede ir muy lejos

Tanto Vulcano como Gaia son responsables de la génesis del segundo componente primario, que abarca los continentes. Del lecho rocoso de los volcanes llegan fragmentos desgajados. La erosión física hace estos fragmentos cada vez más pequeños, convirtiéndolos primero en grava y luego en arena, sedimentos y arcilla. Atraviesan este gradiente de tamaños con ayuda de la alteración química, que transforma también la composición.

Los restos de lo anteriormente vivo atraviesan también una secuencia en la que la disminución de tamaño y la composición sufren alteraciones. La biomasa en descomposición es devorada por carroñeros que se arrastran y horadan, molida físicamente y descompuesta químicamente por lombrices, escarabajos, hormigas e invisípodos. Se incorpora a una compleja red de vida que incluye diminutos gusanos nematodos. Los residuos procedentes de hongos y bacterias no tardan en quedar rodeados por envueltas inorgánicas, formando materiales “húmicos

El resultado es otro componente primario, el suelo. A pesar de las muchas diferencias de una región a otra, el suelo puede ser considerado como un producto de la fisiología. Un aspecto clave de la fertilidad del suelo deriva de la propia vida.

El aire, agitado por turbulencias globales hasta alcanzar una uniformidad, es también uno de los componentes primarios. Pero que esta tercera sustancia primaria de Gaia sea o no una “construcción biótica” que favorece la productividad de la vida, es una cuestión más controvertida como ya se ha intuido en apartados anteriores.

El cuarto componente primario de Gaia es el océano. Entre los iones y las moléculas de agua del océano hay partículas que abarcan un enorme rango de tamaños. Así el océano es como un suelo: una compleja matriz de ofrendas de los mundos tanto biótico como abiótico.

- **METABOLISMO GLOBAL**

Los cuatro componentes primarios expresan conjuntamente algo sobre la realidad de Gaia. Una elección fructífera sería incorporar los ciclos biogeoquímicos a los componentes primarios.

De los seis elementos clave hay que concentrarse en carbono, nitrógeno, fósforo y azufre.

Mirando el inventario de los cuatro elementos, se deduce que los océanos, los suelos y el aire son claramente de la misma importancia, a pesar de sus diferentes apariencias y masas internas. Por otro lado la vida es la última respecto a dos elementos: nitrógeno y carbono. En cuanto al fósforo y el azufre, la vida ocupa el tercer puesto.

Geométricamente, los cuatro componentes emparejados de todos los modos posibles darían lugar a seis relaciones. La relación entre cualquiera de ellos dos tendrá varios subcomponentes: flujos de materia, flujos de energía e influencias. En su mayor parte, los flujos e influencias tienen lugar en interfaces físicas entre pares de componentes primarios.

Las tres relaciones finales de las seis en las que la vida está implicada son: la vida y el aire, la vida y los suelos y la vida y los océanos.

Hablemos de la clorofila. La clorofila es una de las principales moléculas de Gaia, que absorbe las longitudes de onda entre los extremos rojo y azul del espectro solar visible y refleja la parte de la zona media de éste. En el sistema de recolección clorofílico, cada molécula capta la energía por su cuenta y actúa a la vez como parte de una cadena de transmisión global, pasando la energía originalmente absorbida por los otros eslabones de la cadena. La clorofila, recibe la ayuda de una segunda clase de pigmentos, los carotenoides., que reflejan las frecuencias “cálidas” de la luz. El destino último de los embudos de energía son los centros de reacción, unidades integradas de manera compacta por diversas moléculas afianzadas en el seno de las membranas internas de la célula. El resultado final es empujar a un lado de la membrana a los electrones, de carga negativa, y a otro a los iones hidrógeno, con carga positiva.

La presencia de clorofila en todo el mundo implica la presencia de algunos genes globales. La universalización de estos genes y las enzimas que codifican da lugar a un aparato universal en el metabolismo de Gaia, un recolector de fotones que alcanza a todo el planeta, mantenido por el gremio bioquímico de los organismos fotosintetizadores.

El significado profundo de la parte “síntesis” de la fotosíntesis es la incorporación del carbono del dióxido de carbono en forma de moléculas orgánicas. La incorporación del carbono se logra por medio de las “reacciones oscuras”, llamadas así porque no están activadas directamente por la energía de los fotones. En su lugar, su fuente de combustible son las moléculas acumuladoras de energía (NADPH y ATP), producidas en los centros de reacción activados por la luz.

Antecesora en el tiempo y primordial en las reacciones oscuras es otra molécula universal, la ribulosa-1,5-bisfosfato-carboxiloxigenasa (Rubisco). A menudo se la alaba como la proteína individual más abundante de la biosfera.

La actividad como oxigenasa es una señal de las profundas raíces evolutivas de la Rubisco. La fotosíntesis probablemente evolucionara muy al principio de la historia de la vida, en un tiempo en que la atmósfera era muy rica en dióxido de carbono y casi desprovista de oxígeno.Cuál de las dos facetas es la que domina viene determinado por

el resultado de una especie de competencia química, que se inclina de un lado y otro dependiendo de las concentraciones de dióxido de carbono y de oxígeno en el interior de las células, las cuales están a su vez vinculadas a las de la atmósfera que las rodea y las penetra. Una vez crecieron los niveles de oxígeno, la Rubisco estaba ya demasiado inmersa en su papel de la incorporación de carbono de la biosfera como para retroceder evolutivamente de manera fundamental.

Pero existe otra teoría: la actividad de la Rubisco como oxigenasa funciona en gran medida en la fotosíntesis. Si el abastecimiento de dióxido de carbono falla y la cadena de participantes en el ciclo de Calvin corre el riesgo de colapsarse, la capacidad de la Rubisco para oxigenar el RuBP puede, al menos temporalmente, aportar un suministro alternativo de masa al ciclo de Calvin, manteniéndolo en marcha. Esta autoinmolación de moléculas fabricadas en el propio fuego respiratorio de la planta parece contribuir a la conservación de las partes más vitales del conjunto.

Ya sea un malhadado residuo de la evolución o una válvula de seguridad crucial, la actividad oxigenasa de la Rubisco en la atmósfera de hoy en día da lugar a una tasa de fotosíntesis que claramente no está maximizada.

- **ENZIMAS**

Las enzimas universales hacen posibles los diferentes pasos de la glicólisis y el ciclo de Krebs. Las enzimas universales hacen posible la fotosíntesis

Williams ha llegado a la conclusión de que el ciclo de nitrógeno contiene tres enzimas de significado gálico. El primero, la glutamino sintetasa. La segunda enzima en importancia para cubrir las necesidades de nitrógeno de la vida es la nitrato reductasa, que recibe este nombre porque reduce la carga positiva del nitrógeno contenido en los nitratos. La tercera enzima es la nitrogenasa., solo presente en los procariontes.

Las enzimas que mueven el mundo no están siempre en el interior de los organismos. Algunas son segregadas deliberadamente para catalizar reacciones en el entorno inmediato. El fósforo en su mayoría está ligado a materiales orgánicos, pero las plantas necesitan el fósforo en formas de disolución. Cuando se ven afectadas por una deficiencia de fósforo, muchas plantas segregan la fosfatasa ácida, que puede atacar la materia orgánica y liberar fósforo en especies de iones disueltos que las plantas sí pueden utilizar.

Hay otras moléculas que pueden funcionar externamente. Por ejemplo las leguminosas cuando están estresadas sus raíces pueden liberar moléculas denominadas flavonoides, que se difunden por los alrededores y atraen a bacterias fijadoras del nitrógeno, en particular del género *Rhizobium*. Los sideróforos son otras moléculas que se difunden al exterior y que incorporan hierro. Estas moléculas son también adaptativas.

Los ciclos de Gaia, pues no serían accionados por organismos individuales, sino por gremios bioquímicos cuyos miembros comparten un compromiso con enzimas universales. Por tanto no necesitaríamos nuevos principios ecológicos para comprender Gaia, necesitaríamos comprender la dinámica de la biología molecular y como proyectar esa dinámica sobre el sistema global.

LA ENERGÍA INCARDINADA

La energía incardinada es la porción de energía solar que llega a incorporarse a los organismos fotosintéticos como energía química y es utilizada para alimentar los metabolismos de otros organismos. La tasa de incorporación es la cantidad de energía que atraviesa la biota en su camino desde el espacio exterior a través de la Tierra y en su vuelta al espacio exterior.

Esta energía que se incorpora es esencial porque ofrece a la vida el medio de alimentar reacciones químicas que afectan al sistema gaiano.

La energía incardinada y una proporción similar de elementos en todos los seres vivos establecen una red trófica que es fundamental para los ciclos químicos de los elementos esenciales. Estos ciclos se crean no sólo entre los organismos, sino también entre los organismos y las matrices galanas.

• EL ACOPLAMIENTO DE LA VIDA

La cuarta parte de toda la energía absorbida por la tierra mueve el ciclo del agua. La mayor parte de los vapores húmedos surgen de los océanos, los suelos terrestres aportan un tercio de los que se elevan desde la superficie terrestre, y los otros dos tercios son liberados por las hojas de las plantas. El vapor de agua finalmente se enfría y se condensa en pequeñas gotas, liberando su calor almacenado.

La evaporación y la transpiración, por tanto, bombean eficazmente la energía desde la superficie y la convierten en calor atmosférico. La convección seca hace otro tanto. Además, dado que el agua, el suelo y las hojas se calientan por absorción solar, los vientos que pasan sobre ellos elevan su calor al aire eficazmente.

Una pequeña proporción de la radiación infrarroja procedente de la superficie vaga por la atmósfera y se pierde en el espacio. El resto de la energía absorbida por cualquier otro medio acaba en la atmósfera. Desde la atmósfera, la energía vuela, en última instancia, hacia el espacio en forma de emisiones infrarrojas. Hasta la energía de la fotosíntesis escapa finalmente.

Para mantener la circulación que unifica el hacen falta del orden de 3000 a 4000 billones de vatios. Un par de docenas de veces el total de la energía encarnada por la vida; pero sigue siendo una pequeña proporción del total absorbido por la Tierra. Las turbulencias que circulan son por tanto, un ejemplo de cómo una cuantía relativamente baja de energía puede ser, a pesar de todo, vital para el funcionamiento de Gaia.

El calor que fluye del interior de la Tierra hacia la superficie tiene un valor de alrededor de 60 miliwatios por metro cuadrado. Sumada globalmente representa 30 billones de vatios, sólo un tercio de la que incorpora la fotosíntesis. ¿Es significativa? No, a menos que podamos considerar insignificantes la creación de cordilleras montañosas y la separación de los continentes, la liberación de gases, el metamorfismo de las rocas, los intercambios químicos en el centro de los océanos y la dinámica del campo magnético de la Tierra.

Estos tres flujos energéticos quedan minimizados por la conversión de la luz solar en calor por parte del sistema terrestre. Y con todo, las turbulencias y la tectónica son partes indiscutibles del sistema. Así pues, la vida también ha de serlo.

El examen de otro tipo de flujo global nos ofrece una pista sobre cual es el papel de la vida en la conversión de la energía. En este cómputo sumamos toda la energía generada por los combustibles fósiles, la obtenida de saltos de agua y la extraída de los núcleos de átomos radiactivos. Este total será efectivamente menor que el logrado en la fotosíntesis. Los desechos de carbono liberados en forma de dióxido de carbono en toda conversión de combustible fósil en energía representan alrededor de una décima parte del flujo de carbono que se incorpora a la fotosíntesis terrestre

¿Qué podría resultar preocupante en nuestra liberación de una cuantía de energía tan risiblemente baja? ¿Cómo podría la humanidad afectar siquiera al planeta? No se trata del tamaño, se trata de cómo se usa: para incrementar dióxido de carbono en un viaje sin vuelta hacia el cielo. Movemos la materia y hacemos alquimia con ella. Nuestro genio no está en la cantidad bruta de energía que empleamos, sino en cómo lo empleamos: transformamos los estados químicos de la materia.

• **LA IMPRONTA DE LA VIDA**

Cuando las plantas mueren o pierden sus partes, el material caído transporta hacia el suelo los elementos esenciales en las mismas proporciones que tenían cuando estaban vivos. Todos los detritus albergan algo de energía. Los habitantes del subsuelo extraen materiales para sus cuerpos diminutos, a su vez son consumidos por otros más. No obstante, la energía que ha sido almacenada químicamente se degrada inevitablemente al acercarse los materiales cada vez más a su desintegración en iones aislados en el suelo. Cuando la energía incorporada en la biomasa sufre transformaciones en las tramas de la red trófica de los suelos, la forma de la materia se aproxima más a los gustos de las plantas.

Todos los elementos esenciales poseen comportamientos únicos que han de ser comprendidos para poder trazar un retrato realista de Gaia como sistema. Cada elemento tiene sus propias proporciones individuales dentro de la vida, dentro de la materia orgánica del suelo, dentro de los minerales del suelo y dentro de los ríos.

Quienes deseen emprender un estudio de la geofisiología deberían examinar primero los elementos con mayor tasa de reciclaje. Los déficit de estos elementos críticos son los que más probabilidades tienen de poner en peligro un ecosistema porque Vulcano no está dispuesto a ofrecer repuestos.

Resumiendo, la Biosfera es un modelo de superorganismo sabio que soporta pacientemente toso los abusos y transgresiones de una de sus partes creando mecanismos de compensación y esperando que esa parte fuera de equilibrio retome sus funciones de una forma más madura y cercana a la realidad de las leyes por las que se expresa la vida.

La visión integral que la hipótesis sostiene sobre los organismos vivientes, es difícil de comprender desde la perspectiva de la ciencia clásica, ya que requiere una serie de grandes modificaciones de muchos conceptos tradicionales. De ahí que sólo en los últimos años se haya comenzado a discutir abiertamente el significado y sentido de esta nueva visión de la vida en la Tierra.

A partir de las ideas de Lovelock se han originado una multitud de estudios, conferencias, libros y adiciones a la teoría original. Sus implicaciones abarcan virtualmente la totalidad del conocimiento humano, en aspectos tan amplios como la ética, la fisiología, la psicología, la economía y la política.

BIBLIOGRAFÍA

- La Ira de la Tierra. Isaac Asimov y Frederik Pohl
- GAIA TOMA CUERPO: Fundamentos para una fisiología de la Tierra. Tyler Volk. Editorial Cátedra
- LAS EDADES DE GAIA James Lovelock