

J. E. Lovelock

GAIA, UNA NUEVA VISIÓN DE LA VIDA SOBRE LA TIERRA

EDICIONES ORBIS, S.A.

Título original: *GAIA, a new look at Life on Earth*

Traducción de Alberto Jiménez Rioja

Asesor científico de la colección: Pedro Puigdomènech

Dirección de la colección: Virgilio Ortega

© 1979, J. E. Lovelock

Primera publicación por Oxford University Press

© 1983, Hermann Blume Ediciones

© Por la presente edición, Ediciones Orbis, S.A., 1985

Apartado de Correos 35432, Barcelona

ISBN: 84-7634-252-7 D.L.: B. 28759-1985

Impreso y encuadernado por

printer industria gráfica sa provenza 388 08025 barcelona

sant vicenç deis horts

Printed in Spain

Índice

Prefacio.....	4
1. Preliminares	8
2. En los comienzos	17
3. El reconocimiento de Gaia	32
4. Cibernética.....	43
5. La atmósfera contemporánea	55
6. El mar	70
7. Gaia y el hombre: El problema de la contaminación	87
8. Vivir en Gaia	99
9. Epílogo	113
Definiciones y explicaciones de términos	121
Lecturas adicionales	124

Prefacio

El concepto de Madre Tierra o, con el término de los antiguos griegos, Gaia^{*} ha tenido enorme importancia a lo largo de toda la historia de la humanidad, sirviendo de base a una creencia que aún existe junto a las grandes religiones. A consecuencia de la acumulación de datos sobre el entorno natural y de desarrollo de la ecología se ha especulado recientemente sobre la posibilidad de que la biosfera sea algo más que el conjunto de todos los seres vivos de la tierra, el mar y el aire. Cuando la especie humana ha podido contemplar desde el espacio la refulgente belleza de su planeta lo ha hecho con un asombro teñido de veneración que es el resultado de la fusión emocional de conocimiento moderno y de creencias ancestrales. Este sentimiento, a despecho de su intensidad, no es, sin embargo prueba de que la Madre Tierra sea algo vivo. Tal supuesto, a semejanza de un dogma religioso, no es verificable científicamente, por lo que, en su propio contexto, no puede ser objeto de ulterior racionalización.

Los viajes espaciales, además de presentarnos la Tierra desde una nueva perspectiva, han aportado una ingente masa de datos sobre su atmósfera y su superficie, datos que están haciendo posible un mejor entendimiento de las interacciones existentes entre las partes orgánicas y las inertes del planeta. Ello es el origen de la hipótesis según la cual la materia viviente de la Tierra y su aire, océanos y superficie forman un sistema complejo al que puede considerarse como un organismo individual capaz de mantener las condiciones que hacen posible la vida en nuestro planeta.

Este libro es la narración personal de un recorrido por el espacio y el tiempo en busca de pruebas para substanciar tal modelo de la Tierra, una búsqueda que dio comienzo hace aproximadamente quince años y cuyas exigencias me han hecho penetrar en los dominios de muy diferentes disciplinas científicas, de la zoología a la astronomía.

Tal género de excursiones no está exento de sobresaltos, porque la separación entre las ciencias es empeño vehemente de sus respectivos profesores y porque cada una de ellas se sirve de un lenguaje secreto al que es necesario acceder. Por si esto fuera poco, un periplo de tal clase sería, en circunstancias ordinarias, extravagantemente caro y muy poco productivo en resultados científicos; sin embargo, del mismo modo que entre las naciones continúan los intercambios comerciales aun en tiempo de guerra, resulta posible para un químico adentrarse en terrenos tan lejanos de su propia disciplina como la meteorología o la fisiología si tiene algo que ofrecer a cambio, habitualmente en forma de instrumental o de técnicas. En lo que a mí respecta, fue el denominado detector de captura de electrones, uno de los instrumentos que diseñé durante mi fructífera aunque breve época de colaborador con A. J. P. Martin, creador, entre otros importantes avances, de la técnica de analítica química conocida como cromatografía de gases. Pues bien, el mencionado aparato es de una exquisita sensibilidad en la detección de rastros de determinadas

^{*} Según Hesiodo, ante todo fue el Caos; luego Gaia, la del ancho seno, eterno e inquebrantable sostén de todas las cosas (N. del T.).

substancias químicas, gracias a la cual pudo determinarse que los pesticidas están presentes en los organismos de todas las criaturas de la Tierra, que restos de estas sustancias aparecen tanto en los pingüinos de la Antártida como en la leche de las madres lactantes norteamericanas. Este descubrimiento propició la escritura del libro de Rachel Carson *Silent Spring*, obra enormemente influyente, al poner a disposición de la autora las pruebas necesarias para justificar su preocupación por el daño que estos ubicuos compuestos tóxicos infligen a la biosfera. El detector de captura de electrones ha seguido demostrando la presencia de minúsculas pero significativas cantidades de otras sustancias venenosas en lugares que deberían estar absolutamente libres de ellas. Entre estos intrusos se cuentan el PAN (peroxiacetil nitrato), uno de los componentes tóxicos del smog de Los Angeles, los PCB (policlorobifenilos), hallados hasta en los más remotos entornos naturales y, muy recientemente, los clorofluorocarbonos y el óxido nitroso de la atmósfera, sustancias que resultan perjudiciales para la integridad del ozono estratosférico.

Los detectores de captura de electrones fueron indudablemente los objetos más valiosos de entre el conjunto de bienes canjeables que me permitió realizar mi búsqueda de Gaia a través de muy diversos territorios científicos y viajar, literalmente ahora, alrededor del mundo. Con todo, aunque mi disposición al intercambio hizo factible las excursiones interdisciplinarias, su realización concreta no fue empresa fácil porque, en el transcurso de los últimos quince años, las ciencias de la vida han experimentado grandes convulsiones, particularmente en las áreas donde la ciencia se ha visto inmersa en los procesos del poder.

Cuando Rachel Carson nos advierte de los peligros que conlleva la utilización masiva de compuestos químicos venenosos, lo hace con argumentos que presentan al modo de un abogado, es decir: seleccionando un conjunto de hechos con el que justifica sus tesis. La industria química, viendo sus prerrogativas en entredicho, se defiende respondiendo con otro grupo de argumentos seleccionados. Aunque esta forma de denuncia es un modo excelente de lograr que se haga justicia en los aspectos del problema que afectan globalmente a la comunidad (lo que en el caso citado quizá la haga científicamente disculpable) parece haberse constituido en modelo a seguir: gran parte de las discusiones o las argumentaciones científicas actuales relativas al medio ambiente dejan un intenso regusto a sala de tribunal o a encuesta pública. Nunca se repetirá demasiado que, si bien tal modo de hacer las cosas puede ser de provecho para el proceso democrático de la participación pública en los asuntos de interés general, no es la mejor forma de descubrir verdades científicas. Se dice que, en las guerras, las primeras heridas las sufre la verdad: no es menos cierto que su utilización selectiva para justificar la formulación de veredictos la debilita considerablemente.

Cuando de asuntos medioambientales se trata, la comunidad científica parece estar dividida en grupos beligerantes colectivizados, en tribus enfrentadas cuyos miembros sufren fuertes presiones por parte de los dogmas oficiales respectivos para que se adecuen a ellos. Si bien los seis primeros capítulos del libro se ocupan de materias no —todavía no, al menos— socialmente conflictivas, los seis últimos, cuyo tema es la relación

entre Gaia y la humanidad, se sitúan de lleno en la zona de hostilidades.

Sir Alan Parker decía en su obra *Sex, Science and Society* que "la ciencia puede ser seria sin ser sacrosanta", sabia afirmación que he procurado tener presente a lo largo de todo el libro aunque, a veces, la tarea de escribir para el lector no especializado sobre temas cuyo lenguaje es normalmente esotérico pero preciso ha podido conmigo, por lo cual ciertos fragmentos pueden parecer infectados tanto de antropomorfismo como de teleología.

Utilizo a menudo la palabra Gaia como abreviatura de la hipótesis misma, a saber: la biosfera es una entidad autorregulada con capacidad para mantener la salud de nuestro planeta mediante el control del entorno químico y el físico. Ha sido ocasionalmente difícil, sin acudir a circunlocuciones excesivas evitar hablar de Gaia como si fuera un ser consciente: deseo subrayar que ello no va más allá del grado de personalización que a un navío le confiere su nombre, reconocimiento a fin de cuentas de la identidad que hasta una serie de piezas de madera y metal puede ostentar cuando han sido específicamente diseñadas y ensambladas, del carácter que trasciende a la simple suma de las partes.

Al poco de concluir este libro llegó a mis manos un artículo de Alfred Redfield publicado en el *American Scientist* de 1958 donde se formulaba la hipótesis de que la composición química de la atmósfera y de los océanos estaba controlada biológicamente, hipótesis basada en la diferente distribución de ciertos elementos. Me alegra haber tenido noticia de la contribución de Redfield a la hipótesis de Gaia a tiempo de reconocerla aquí, aunque soy consciente de que muchos otros se habrán hecho reflexiones semejantes y algunos las habrán publicado. La noción de Gaia, de una Tierra viviente, no ha sido aceptable en el pasado para la corriente principal de la ciencia, por lo que las semillas lanzadas en época anterior han permanecido enterradas, sin germinar, en el profundo humus de las publicaciones científicas.

Un libro cuya materia tiene una base tan amplia como la de éste requirió amplias dosis de asesoramiento, generosamente prestado por gran número de colegas científicos que pusieron a mi disposición su tiempo para ayudarme; de entre todos ellos quiero hacer especial mención de la profesora Lynn Margulis de Boston, mi constante ayuda y guía. Estoy también en deuda con el profesor C. E. Junge de Mainz y el profesor Bollin de Estocolmo, los primeros en animarme a escribir sobre Gaia, así como con el doctor James Lodge de Boulder, Colorado, Sidney Epton de la Shell Research Ltd. y Peter Fellgett de Reading, que me instó a seguir investigando.

Deseo expresar mi especial gratitud a Evelyn Frazer, que transformó el borrador de este libro, abigarrado amasijo de párrafos y frases, en un texto legible, realizando tan competentemente esta tarea que el resultado final es aquello que era mi intención decir expresado del modo que yo hubiera elegido de haber sido capaz de ello.

Quiero, por último, dejar constancia de una deuda con Helen Lovelock que se encargó no sólo de realizar el borrador mecanografiado, sino también de crear el entorno que hizo posible tanto la reflexión como la escritura. Al final del libro y agrupados por capítulos, incluyo la relación de

las fuentes de información utilizadas y de lecturas adicionales, así como algunas definiciones y explicaciones sobre los términos y los sistemas de unidades y medidas empleadas en el texto.

1. Preliminares

Mientras esto escribo, dos naves espaciales Viking orbitan alrededor de Marte en espera de las órdenes que, procedentes de la Tierra, las harán posarse sobre la superficie del planeta. Su misión consiste en dilucidar la presencia de vida o, en su defecto, buscar pruebas de su presencia en un pasado próximo o remoto. El propósito de este libro es efectuar una indagación equivalente: La búsqueda de Gaia es el intento de encontrar la mayor criatura viviente de la Tierra. Nuestro peregrinaje quizá no revele otra cosa que la casi infinita variedad de formas de vida surgidas en el seno de la transparente envoltura de aire que constituye la biosfera. Pero si Gaia existe, sabremos entonces que los muy diferentes seres vivos que pueblan este planeta, especie humana incluida, son las partes constitutivas de una vasta entidad que, en su plenitud, goza del poder de mantener las condiciones gracias a las cuales la Tierra es habitat adecuado para la vida.

La búsqueda de Gaia comenzó hace más de quince años, coincidiendo con los primeros planes de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) estadounidense encaminados a resolver la incógnita de la existencia de vida en Marte. Resulta por consiguiente obligado iniciar este libro rindiendo homenaje a la increíble expedición marciana de esos dos vikingos mecánicos.

A principios de los sesenta solía hacer frecuentes visitas a los Laboratorios de Retropropulsión del Instituto Tecnológico de California en calidad de asesor de un equipo —posteriormente dirigido por Norman Horowitz, biólogo espacial de la máxima competencia— cuyo objetivo principal era la puesta a punto de métodos y sistemas que permitieran la detección de eventuales formas de vida en Marte y otros planetas. Aunque mi función específica era el asesoramiento en ciertos problemas comparativamente simples de diseño de instrumentos, me sentí cautivado —y cómo hubiera podido ser de otro modo en alguien que había crecido deslumbrado por Verne y Stapledon— por la posibilidad de estar presente en unas reuniones donde el tema a discusión eran los planes del estudio de Marte.

En aquella época, la planificación de experimentos se basaba sobre todo en el supuesto de que la obtención de pruebas de vida en Marte tendría características muy similares a ese mismo proceso desarrollado en la Tierra. Por ejemplo: una de las series experimentales propuestas habría de ser realizada por un ingenio que era, a todos los efectos, un laboratorio automatizado de microbiología, cuyo cometido consistiría en tomar muestras del suelo marciano y estudiarlo, para dilucidar si su naturaleza permitía la aparición de bacterias, hongos u otros microorganismos. Se habían ideado experimentos edáficos adicionales para poner de manifiesto los compuestos químicos indicativos de vida: las proteínas, los aminoácidos y, en particular, las sustancias ópticamente activas que desviarán los rayos de luz polarizada en sentido antihorario, tal como hace la materia orgánica. Tras cosa de un año, y posiblemente a causa de no estar involucrado de manera directa, mi fervor inicial por el problema empezó a

remitir, comenzando al mismo tiempo a formularme preguntas de índole sumamente práctica, como por ejemplo, "¿qué nos asegura que la vida marciana, de existir, se nos revelará mediante unas pruebas diseñadas según la vida terrestre?"; otras preguntas sobre la naturaleza de la vida y su reconocimiento eran todavía más conturbadoras.

Algunos de mis colegas aún entusiastas de los Laboratorios confundieron mi creciente escepticismo con cínica desilusión y me interrogaron razonablemente sobre mis alternativas. En aquellos años mi respuesta era indicar vagamente que yo, en su lugar, me preocuparía en especial de la disminución de la entropía, puesto que es algo común a todas las formas de vida. Esta sugerencia, comprensiblemente, era considerada poco práctica en el mejor de los casos; otros opinaban que era producto de la ofuscación pura y simple, ya que pocos conceptos físicos han originado tanta confusión y tantos malentendidos como el concepto de entropía.

Es casi sinónimo de desorden y, sin embargo, en tanto que medida de la tasa de disipación de la energía térmica de un sistema dado, puede expresarse pulcramente en términos matemáticos. Ha sido la maldición de generaciones enteras de estudiantes y para muchos está ominosamente asociada con la degradación y la decadencia, dado que su expresión en la segunda ley de la termodinámica (indicando que toda la energía se disipará más tarde o más temprano en forma de calor y dejará de estar disponible para la realización de trabajo útil) implica la inevitable y predestinada muerte térmica del Universo.

A pesar del rechazo a mi sugerencia, la idea de la disminución o la inversión de la entropía como signo de vida se había implantado en mi mente. Fue madurando poco a poco, hasta que, con la ayuda de muchos colegas (Dian Hitchcock, Sidney Eptonn, Peter Simmonds y especialmente Lynn Margulis) se transformó en la hipótesis que constituye el tema de este libro.

Cuando, después de las visitas a los Laboratorios de Retropropulsión, volvía a casa (situada en la apacible campiña de Wiltshire), dedicaba muchos ratos a leer y a reflexionar sobre la auténtica naturaleza de la vida y sobre cómo podría reconocérsela con independencia de lugares y de formas. Confiaba en que, revisando la literatura científica, terminaría por encontrar en alguna parte una definición de la vida como proceso físico que pudiera servir de punto de partida para diseñar experimentos encaminados a detectarla; para mi sorpresa pude comprobar que era muy poco lo escrito sobre la naturaleza misma de la vida. El interés actual por la ecología y la aplicación del análisis de sistemas a la biología estaban en mantillas; en aquellos días, sobre las ciencias de la vida pesaba un academicismo inerte y polvoriento. Eran incontables los datos acumulados sobre prácticamente cualquier aspecto de las distintas especies de seres vivos, pero el aluvión de hechos ignoraba la cuestión central, la vida misma. En el mejor de los casos, los artículos científicos de otro planeta llegados a la Tierra en viaje de estudios consiguieran un televisor y dictaminaran sobre él. El químico señalaría que en su confección entraban la madera, el vidrio y el metal, mientras que para el físico sería una fuente de radiación de luz y calor y el ingeniero haría notar que las ruedecillas eran demasiado pequeñas y estaban mal colocadas para que pudiesen rodar suavemente

sobre una superficie plana. Pero nadie diría nada sobre lo que era en realidad.

Lo que aparentemente es una conspiración de silencio puede deberse, en parte, a la fragmentación de la ciencia en disciplinas aisladas, cuyos especialistas respectivos suponen que los demás se habrán encargado de la tarea. Algunos biólogos pueden pensar que el proceso de la vida queda adecuadamente descrito mediante la expresión matemática de conceptos físicos o cibernéticos, al tiempo que ciertos físicos dan por supuesta la descripción objetiva de dicho proceso en los recónditos vericuetos de las publicaciones dedicadas a la biología molecular, material cuya lectura siempre queda relegada ante tareas más urgentes. Pero la causa más probable de nuestra cerrazón ante este problema es que entre nuestros instintos heredados hay ya un programa muy rápido y eficiente destinado al reconocimiento de la vida, una memoria "readonly", en la jerga de la informática. Reconocemos automática e instantáneamente a los seres vivos, ya sean animales o vegetales, característica que compartimos con los demás miembros del reino animal; este eficaz proceso de reconocimiento inconsciente se desarrolló, con toda certeza, como factor de supervivencia. Un ser vivo puede ser multitud de cosas para otro: comestible, mortífero, amistoso, agresivo o pareja potencial, posibilidades todas de primordial importancia para el bienestar y la supervivencia. Nuestro sistema de reconocimiento automático de lo vivo parece sin embargo haber paralizado la capacidad de pensamiento consciente sobre qué define a la vida. ¿Por qué habríamos de necesitar definir lo que, gracias a nuestro sistema de reconocimiento innato, resulta obvio e inconfundible en todas y cada una de sus manifestaciones? Quizá por esa misma razón es un proceso cuyo funcionamiento no depende de la mente consciente, como el piloto automático de un avión.

Ni siquiera la reciente ciencia de la cibernética, con su interés por los modos de funcionamiento de todo género de sistemas (desde el complejo proceso de control visual que posibilita la lectura de esta página a la simplicidad de un depósito de agua provisto de una válvula) ha prestado atención al problema; aunque mucho ha sido lo dicho y lo escrito sobre los aspectos cibernéticos de la inteligencia artificial, continúa incontestada la pregunta de cómo definir la vida en términos cibernéticos, cuestión, además, raramente debatida.

En el transcurso del presente siglo, algunos físicos han intentado definir la vida. Bernal, Schroedinger y Wigner llegaron los tres a idéntica conclusión general: la vida pertenece a esa clase de fenómenos compuestos por sistemas abiertos o continuos capaces de reducir su entropía interna a expensas, bien de sustancias, o bien de energía libre que toman de su entorno, devolviéndolas a éste en forma degradada. Esta definición es difícil de captar y excesivamente vaga para que resulte aplicable a la detección específica de vida. Parafraseándola toscamente, podríamos decir que la vida es uno de esos fenómenos surgidos allí donde haya un elevado flujo de energía. El fenómeno de la vida se caracteriza por su tendencia a la autoconfiguración como resultado del consumo de sustancias o de energía antedicho, excretando hacia el entorno productos degradados.

Resulta evidente que esta definición es aplicable a los remolinos de un arroyo, a los huracanes, a las llamas o incluso a ciertos artefactos humanos como podrían ser los refrigeradores. Una llama asume una forma característica, necesita de un aporte adecuado de combustible y de aire para mantenerse y no podemos dejar de advertir que el precio a pagar por una bella y agradable fogata al aire libre es el derroche de energía calorífica y la emisión de gases contaminantes. La formación de llamas reduce localmente la entropía, pero el consumo de combustible significa un incremento de la entropía global.

A despecho de su amplitud y vaguedad, esta clasificación de la vida indica al menos la dirección acertada. Sugiere, por ejemplo, que existe una frontera o interfase entre el área "fabril" que procesa el flujo de energía o las materias primas, con la consiguiente disminución de la entropía, y el entorno que recibe los desechos generados por este procesamiento. Sugiere también que los procesos de la vida —o los que a ellos se asemejan— requieren un aporte energético por encima de un determinado valor mínimo para iniciarse y para mantenerse. Un físico decimonónico, Reynolds, observó que las turbulencias de líquidos y gases aparecían únicamente cuando el flujo superaba un cierto nivel crítico en relación con las condiciones locales. Para calcular la magnitud adimensional de Reynolds basta conocer las propiedades del fluido en cuestión y sus condiciones locales de flujo. De modo semejante: para que aparezca la vida, el flujo de energía ha de ser lo suficientemente importante, no sólo en cuantía sino también en calidad, en potencial. Si, por ejemplo, la temperatura de la superficie del Sol fuera de 500° centígrados en lugar de serlo de 5.000° y su distancia a la Tierra se redujera correspondientemente, de tal modo que recibiéramos la misma cantidad de calor, las diferencias climáticas respecto a las condiciones reales quizá fueran escasas, pero la vida nunca habría hecho acto de presencia. La vida requiere una energía lo bastante potente como para romper las uniones químicas: la mera tibieza no basta.

Si fuéramos capaces de establecer magnitudes adimensionales como la de Reynolds para caracterizar las condiciones energéticas de un planeta estaríamos en condiciones de construir una escala cuya aplicación nos permitiría predecir dónde sería posible la vida y dónde no. Aquellos que, como la Tierra, reciben un flujo continuo de energía solar superior a los mencionados valores críticos estarían en el primer supuesto, mientras que los planetas exteriores, más fríos, caerían dentro del segundo.

En la época citada, sin embargo, poner a punto un medio experimental de detección de la vida con validez universal basado en la disminución de entropía aparentaba ser una tarea poco prometedora. Asumiendo, a pesar de todo, que la vida habría de servirse siempre de los medios fluidos —la atmósfera, los océanos o ambos— utilizándolos como cintas transportadoras de materias primas o de productos de desecho, se me ocurrió que parte de la actividad asociada a las intensas reducciones de entropía características de un sistema viviente pasaría al entorno empleado como vehículo de transporte modificando su composición. La atmósfera de un planeta en el que hubiera vida sería por lo tanto netamente distinguible de la atmósfera de otro desprovisto de ella.

Marte carece de océanos. La vida, de haber aparecido, habría tenido que hacer uso de la atmósfera o estancarse. Por tal motivo, Marte parecía un planeta apropiado para emplear un sistema de detección de vida basado en el análisis químico de la atmósfera. Tal enfoque ofrecía además la nada desdeñable ventaja de que su realización no se vería influenciada por el lugar de descenso del vehículo espacial: la mayoría de las técnicas experimentales de detección de vida son eficaces únicamente en el marco de una zona concreta. Ni siquiera en nuestro planeta las técnicas locales de identificación darían mucho fruto si el aterrizaje se produjera en el centro de un lago salobre, en el desierto del Sahara o en el manto de hielo que cubre la Antártida.

Habían alcanzado este punto mis reflexiones cuando Dian Hitchcock visitó los Laboratorios. Su tarea era comparar y evaluar la lógica y el potencial informativo de las muchas sugerencias suscitadas por el problema de la detección de vida en Marte. La noción del análisis atmosférico como medio de detectar la presencia de vida le resultó atractiva y nos pusimos a desarrollar la idea juntos. Utilizando nuestro propio planeta como modelo empezamos a examinar hasta qué punto podíamos obtener indicaciones fiables de la presencia de vida conjugando determinaciones tales como la composición química de la atmósfera, la cuantía de la radiación solar y las masas oceánicas o continentales.

Los resultados obtenidos nos convencieron de que la única explicación factible de la atmósfera de la Tierra, altamente improbable, era su manipulación diaria desde la superficie, y que el agente manipulador era la vida misma. El significativo decremento de la entropía —o, como un químico diría, el persistente estado de desequilibrio entre los gases atmosféricos— era, por sí mismo, prueba evidente de actividad biológica. Piénsese, por ejemplo, en la presencia simultánea de metano y oxígeno en nuestra atmósfera. A la luz del sol estos dos gases reaccionan químicamente para dar dióxido de carbono y vapor de agua. La tasa de reactividad es tan grande que, para mantener constante el metano del aire, es necesario introducir en la atmósfera 1.000 millones de toneladas de este gas, cuando menos, cada año. Hay que contar también con los medios requeridos para reemplazar el oxígeno gastado en la oxidación del metano, teniendo en cuenta que ello exige al menos dos veces más oxígeno que metano. Las cantidades de ambos gases necesarias para mantener constante la extraordinaria mezcla atmosférica de la Tierra tendrían, en un entorno inerte, un altísimo grado de improbabilidad.

Así pues, mediante una técnica comparativamente sencilla, era posible obtener pruebas convincentes de la existencia de vida en la Tierra, pruebas que además, eran obtenibles utilizando un telescopio infrarrojo situado en un punto tan lejano como podría ser Marte. La misma regla se aplica a los demás gases de la atmósfera, especialmente al acoplamiento o conjunto de gases reactivos que constituyen el grueso de su volumen. La presencia en ella de óxido nitroso y de amoníaco es tan anómala como la de metano. Hasta el nitrógeno gaseoso está fuera de lugar, porque si pensamos en los vastos océanos terrestres, parecería lógico el que este elemento se presentara bajo la forma, químicamente estable, de ion nitrato disuelto en las aguas oceánicas.

Estábamos a mediados de la década de los sesenta, sin embargo: nuestros hallazgos y conclusiones disonaban chirriantemente en el contexto de la geoquímica convencional. Con algunas excepciones —especialmente Rubey, Hutchinson, Bates y Nicolet— los geoquímicos consideraban la atmósfera como el producto final del desprendimiento planetario de gases y mantenían que su estado presente era consecuencia de reacciones subsiguientes acaecidas en el seno de procesos abiológicos. El oxígeno, por ejemplo, procedería únicamente de la escisión del vapor de agua en sus componentes originarios: al escapar el hidrógeno al espacio quedaba tras él un exceso de oxígeno. La vida se limitaba a tomar prestados gases de la atmósfera y a devolverlos a ella como los había recibido. Para nosotros, por el contrario, la atmósfera era una extensión dinámica de la biosfera misma. No resultó sencillo encontrar una publicación que quisiera acoger en sus páginas una noción tan radical, pero tras diversos rechazos dimos con un editor, Carl Sagan, que accedió a darle cabida en su revista, *Icarus*.

Considerándolo tan sólo como un medio para detectar la presencia de vida, el análisis atmosférico tuvo, no obstante, un gran éxito. Los datos con que se contaba en aquellos años eran suficientes para afirmar que la atmósfera marciana era básicamente dióxido de carbono; no había signos de que sus características químicas fueran tan exóticas como las de la Tierra. Ello implicaba que Marte, probablemente, fuera un planeta muerto, noticia no precisamente grata para quienes patrocinaban nuestros proyectos de investigación espacial. Para empeorar todavía más las cosas, el Congreso estadounidense decidió, en septiembre de 1965, abandonar el primer programa de exploración de Marte, denominado entonces Voyager. Durante aproximadamente un año después de esa fecha, las ideas relativas a la búsqueda de vida en otros planetas no recibirían la mejor de las acogidas.

La exploración del espacio ha sido siempre un excelente blanco para quienes buscan dinero para una causa u otra, aunque su coste es muy inferior al de muchos fracasos tecnológicos pedestres y anticuados. Por desgracia, los apologistas de la ciencia espacial parecen quedar siempre sumamente impresionados por cosas tales como las sartenes no adherentes y los rodamientos perfectos. A mi modo de ver, el mejor subproducto de la investigación espacial no es precisamente nueva tecnología sino que, por primera vez en la historia de la humanidad, hemos tenido oportunidad de contemplar la Tierra desde el espacio: la información proporcionada por esta visión exterior de nuestro planeta verdeazul, en todo el esplendor de su belleza, ha dado origen a un nuevo conjunto de preguntas y respuestas. De forma semejante, el reflexionar sobre la vida marciana supuso la adquisición de una nueva perspectiva desde la que considerar la vida en la Tierra, lo que nos llevó a su vez a formular una nueva explicación —o a revivir quizá una muy antigua— de la relación entre la Tierra y su biosfera.

Por lo que a mí respecta, tuve la gran fortuna de recibir una invitación de la Shell Research Limited a estudiar las posibles consecuencias globales que sobre la contaminación atmosférica tendrían causas tales como la tasa de consumo, siempre en aumento, de los combustibles fósiles, invitación que llegaba en el nadir de la investigación espacial, en 1966, tres años

antes de la formación de Amigos de la Tierra; ese colectivo, y otros grupos de presión de parecidas características, se encargarían de poner el problema de la contaminación en la vanguardia de las preocupaciones de la opinión pública.

Los científicos independientes, como los artistas, necesitan de los mecenas, aunque ello no tiene porqué implicar una relación de posesión: la libertad de pensamiento suele ser la norma. No debería hacer falta decir esto, pero hoy día muchas personas, por otro lado inteligentes, están condicionadas para creer que toda labor de investigación realizada bajo los auspicios de una multinacional es sospechosa por naturaleza. Otros están no menos persuadidos de que todo trabajo de esta índole procedente de alguna institución localizada en un país socialista ha de haber estado sometido al corsé teórico del marxismo, siendo, por tal motivo, desdeñable. Las ideas y opiniones expresadas en este libro muestran cierto grado de influencia inevitable de la sociedad en cuyo seno vivo y trabajo, debida sobre todo al contacto estrecho con numerosos colegas científicos occidentales. Hasta donde se me alcanza, estas suaves presiones son las únicas que se han ejercido sobre mí.

La conexión entre los problemas de la contaminación atmosférica y mi trabajo anterior —utilización del análisis atmosférico como medio de detección de vida— residía, naturalmente, en la idea de que la atmósfera podría ser una extensión de la biosfera. Tenía la impresión que todo intento de entender la contaminación de la atmósfera sería incompleto y probablemente ineficaz si se pasara por alto la posibilidad de una respuesta o una adaptación de la biosfera. Los efectos del veneno en un ser humano dependen grandemente de la capacidad que éste tenga para metabolizarlo o excretarlo; de igual modo, el efecto de lanzar grandes cantidades de productos derivados de la combustión de combustibles fósiles a una atmósfera controlada por la biosfera puede ser muy distinto del efecto que estos gases tendrían sobre una atmósfera inorgánica y por tanto, pasiva. Podrían producirse cambios adaptativos que disminuyeran, por ejemplo, las perturbaciones provocadas por la acumulación de dióxido de carbono. Otra posibilidad sería que las perturbaciones dispararan algún tipo de cambio compensatorio (quizás en el clima) que resultara conveniente para el conjunto de la biosfera pero perjudicial para la especie humana.

Al trabajar en un nuevo entorno intelectual pude olvidarme de Marte y concentrarme en la Tierra y en la naturaleza de su atmósfera. El resultado de esta aproximación menos dispersa fue el desarrollo de la hipótesis siguiente: el conjunto de los seres vivos de la Tierra, de las ballenas a los virus, de los robles a las algas, puede ser considerado como una entidad viviente capaz de transformar la atmósfera del planeta para adecuarla a sus necesidades globales y dotada de facultades y poderes que exceden con mucho a los que poseen sus partes constitutivas.

No es distancia pequeña la que separa el sistema plausible de detección de vida y la hipótesis según la cual es la biosfera, el conjunto de los seres vivos que pueblan la superficie de la Tierra, la encargada de mantener y regular la atmósfera de ésta. A presentar las pruebas más recientes en favor de tal hipótesis se consagra buena parte de este libro. Volviendo a 1967, las razones que justificaban el salto del sistema a la hipótesis podrían resumirse

como sigue:

La vida aparece en la Tierra hace aproximadamente unos 3.500 millones de años. Desde entonces hasta ahora, los fósiles muestran que el clima de la Tierra ha cambiado muy poco a pesar de que, casi con toda seguridad, la cantidad de calor solar que recibimos, las características de la superficie de la Tierra y la composición de su atmósfera han experimentado grandes variaciones durante ese lapso de tiempo.

La composición química de la atmósfera no guarda relación con lo que cabría esperar de un equilibrio químico de régimen permanente. La presencia de metano, óxido nitroso y de nitrógeno incluso en nuestra oxidante atmósfera actual representa una violación tan estrepitosa de las reglas de la química que hace pensar que la atmósfera no es un nuevo producto biológico sino, más probablemente, una construcción biológica: si no viva, algo que, como la piel de un gato, las plumas de un pájaro o el papel de un nido de avispas es una extensión de un sistema viviente diseñada para conservar las características de un determinado entorno. La concentración atmosférica, por ejemplo, de gases tales como el oxígeno o el amoníaco es mantenida a unos niveles óptimos cuya alteración, por pequeña que fuera, podría tener desastrosas repercusiones en los seres vivos.

Tanto ahora como a lo largo de la historia de la Tierra, su climatología y su química parecen haber sido en todo momento las óptimas para el desarrollo de la vida. Que esto se deba a la casualidad es tan improbable como salir ileso de un atasco de tráfico conduciendo con los ojos vendados.

Pues bien, se concreta la hipótesis antedicha en una entidad de tamaño planetario y propiedades insospechadas atendiendo a la simple suma de sus partes. Fue William Golding, el escritor, vecino a la sazón, quien solventó felizmente su carencia de nombre. Recomendó sin vacilación que esta criatura fuera llamada Gaia en honor de la diosa griega de la Tierra, también conocida como Gea, nombre de donde proceden los de ciencias tales como la geografía y la geología. A pesar de mi ignorancia de los clásicos, la oportunidad de la elección me pareció evidente. Era una palabra breve que se anticipaba a alguna bárbara denominación del tipo de Sistema de Homeostasis y Biocibernética Universal. Tenía, además, la impresión de que en la Grecia antigua el concepto era probablemente un aspecto familiar de la vida sin necesidad de expresarlo formalmente. Los científicos suelen estar condenados a llevar vidas urbanas, pero he tenido oportunidad de constatar el asombro que la gente de zonas rurales, más próximas a la tierra, siente ante la necesidad de proposiciones formales para enunciar algo tan evidente como la hipótesis de Gaia.

La di a conocer oficialmente en unas jornadas científicas sobre los orígenes de la vida en la Tierra celebradas en Princeton, New Jersey, en 1969. Quizá la causa fuera una pobre presentación por mi parte, pero lo cierto es que los únicos interesados por ella fueron el malogrado químico sueco Lars Gunnar Sillen y Lyn Margulis, de la Universidad de Boston, a

cuyo cargo corría la tarea de editar nuestras diversas contribuciones. Lyn y yo volveríamos a encontrarnos en Boston un año más tarde, iniciando una muy fructífera colaboración aún felizmente prolongada que, gracias a su talento y a sus conocimientos, iba a perfilar nítidamente los entonces todavía vagos contornos de Gaia.

Hasta aquí hemos definido a Gaia como una entidad compleja que comprende el suelo, los océanos, la atmósfera y la biosfera terrestre: el conjunto constituye un sistema cibernético autoajustado por realimentación que se encarga de mantener en el planeta un entorno físico y químicamente óptimo para la vida. El mantenimiento de unas condiciones hasta cierto punto constantes mediante control activo es adecuadamente descrito con el término "homeostasis".

Gaia continúa siendo una hipótesis, bien que, como ha sucedido en otros casos, útil: aunque todavía no ha demostrado su existencia, sí ha probado ya su valor teórico al dar origen a interrogantes y respuestas experimentales de por sí provechosas. Si, por ejemplo, la atmósfera es entre otras cosas una cinta transportadora de sustancias que la biosfera toma y expelle, parecía razonable suponer la presencia en ella de compuestos que vehicularan los elementos esenciales a todos los sistemas biológicos, como lo son, entre otros, el yodo y el azufre. Fue muy gratificante encontrar pruebas de que ambos son transportados por aire desde los océanos, donde abundan, a tierra firme, donde escasean, y que los compuestos portadores son el metil yoduro y el dimetil sulfuro respectivamente, sustancias directamente producidas por la vida marina. Habida cuenta de la insaciable curiosidad que caracteriza al espíritu científico, estas interesantes sustancias habrían terminado por ser detectadas y su importancia discutida aún sin el estímulo de la hipótesis Gaia, pero fue precisamente ella la que provocó su búsqueda activa.

Si Gaia existe, su relación con la especie humana, esa especie animal que ejerce una influencia dominante en el complejo sistema de lo vivo y el cambiante equilibrio de poder entre ambas, son cuestiones de evidente importancia. Serán consideradas en capítulos posteriores, pero quiero subrayar que este libro ha sido escrito primordialmente para estimular y entretener. La hipótesis Gaia es para aquellos que gustan de caminar, de contemplar, de interrogarse sobre la Tierra y sobre la vida que en ella hay, de especular sobre las consecuencias de nuestra presencia en el planeta. Es una alternativa al pesimista enfoque según el cual la naturaleza es una fuerza primitiva a someter y conquistar. Es también una alternativa al no menos deprimente cuadro que pinta a nuestro planeta como una nave espacial demente que, sin piloto ni propósito, describe círculos eternos alrededor del Sol.

2. En los comienzos

Cuando se emplea en un contexto científico el término eón representa 1.000 millones de años. Por lo que nos indican los estratos geológicos y la medida de su radiactividad, la Tierra comenzó a existir como cuerpo espacial independiente hace unos 4.500 millones de años o, lo que es lo mismo, hace cuatro eones y medio. Los primeros rastros de vida hasta ahora identificados han aparecido en rocas sedimentarias cuya edad se cifra en más de tres eones. Sin embargo, como decía H.G. Wells, el registro geológico ofrece un tipo de información sobre la vida en épocas remotas comparable al conocimiento que de los miembros de una vecindad podría obtenerse examinando los libros de un banco. Probablemente se cuenten por millones las formas de vida primitivas de cuerpo blando que, si bien florecieron en un momento dado, se extinguieron después sin dejar huellas para el futuro ni, muchísimo menos, obviamente, esqueleto alguno para el gabinete geológico.

No es ninguna sorpresa, por tanto, que se sepa poco sobre el origen de la vida en nuestro planeta y menos todavía sobre las primeras etapas de su evolución. Pero por lo que toca al entorno en el que se inició la vida —eventualmente Gaia— revisando lo que sabemos respecto a los comienzos de la Tierra en el contexto del Universo del que se formó, podemos por lo menos hacer suposiciones inteligentes. Por observaciones realizadas en nuestra propia galaxia sabemos que un conglomerado de estrellas se asemeja a una población humana en lo variado de las edades de sus componentes, que van de los más viejos a los más jóvenes. Hay estrellas viejas que, como antiguos soldados, simplemente se desvanecen, mientras la muerte de otras, más espectacular, es un estallido inimaginablemente glorioso; cobran forma, entretanto, esferas incandescentes orbitadas por satélites que giran a su alrededor como polillas en torno a una vela. Cuando examinamos espectroscópicamente el polvo interestelar y las nubes gaseosas de cuya condensación surgen nuevos soles y nuevos planetas, hallamos gran abundancia de las moléculas simples y compuestas a partir de las cuales es posible construir el edificio de la vida. Estas moléculas, en realidad, parecen estar dispersas por todo el Universo. Los astrónomos informan casi semanalmente del descubrimiento de alguna nueva sustancia orgánica compleja hallada en las profundidades del espacio. Se tiene a veces la impresión de que nuestra galaxia es un almacén gigantesco donde se guardan los componentes de la vida.

Si imaginamos un planeta hecho exclusivamente con piezas de relojes, no parece disparatado suponer que, con tiempo por delante —pongamos, por ejemplo, unos 1.000 millones de años—, las fuerzas gravitatorias y la incansable acción del viento terminarán ensamblando un reloj en perfecto funcionamiento. Probablemente el comienzo de la vida en la Tierra fue algo similar. El incontable número de encuentros fortuitos entre moléculas, esenciales para la vida, la casi infinita variedad de combinaciones posibles, bien pudo haber resultado en el ensamblaje casual de una sustancia capaz de efectuar una tarea de tipo biológico, por ejemplo acumular luz solar para utilizar la energía en la realización de algún cometido posterior

que no hubiera sido posible de otro modo o que las leyes físicas no hubieran permitido. El antiguo mito griego de Prometeo, que intentó robar el fuego de los dioses, y la historia bíblica de Adán y Eva, arrastrados por el deseo de saborear la fruta prohibida, quizá se hundan mucho más profundamente en nuestra historia ancestral de lo que sospechamos. Al aumentar posteriormente el número de estos compuestos, empezó a ser posible que algunos de ellos se combinaran entre sí para formar nuevas sustancias de mayor complejidad dotadas de nuevas propiedades y poderes distintos, agentes a su vez de idéntico proceso que se repetiría hasta la eventual llegada a una entidad compleja cuyas propiedades eran, por fin, las de la vida: fue el primer microorganismo capaz de utilizar la luz de sol y las moléculas de su entorno para producir su propio duplicado.

Esta secuencia de acontecimientos conducente a la formación del primer ser vivo tenía casi todo en contra. Por otro lado, el número de encuentros fortuitos acaecidos entre las moléculas de la sustancia primigenia de la Tierra debe haber sido verdaderamente incalculable. La vida era, pues, un acontecimiento casi completamente improbable que tenía casi infinitas oportunidades de suceder y sucedió. Supongamos al menos que las cosas ocurrieron de esta forma en lugar de acudir a misteriosas siembras de semillas, esporas llegadas de no se sabe dónde o cualquier otro tipo de intervención externa. Nuestro interés primordial, en cualquier caso, se centra en la relación surgida entre la biosfera que se forma y el entorno planetario de una Tierra todavía joven, no en el origen de la vida.

¿Cuál era el estado de la Tierra justamente antes de la aparición de la vida, hace, digamos, unos tres eones y medio? ¿Por qué surgió la vida en nuestro planeta y no lo hizo en Marte y Venus, sus parientes más cercanos? ¿Con qué riesgos se enfrentó la joven biosfera, qué desastres estuvieron a punto de destruirla y cómo la presencia de Gaia ayudó a superarlos? Antes de sugerir algunas respuestas a estas intrigantes preguntas hemos de volver a las circunstancias que rodearon la formación de la Tierra, hace aproximadamente cuatro eones y medio.

Parece casi seguro que la formación de una supernova —la explosión de una estrella de gran tamaño— fue el antecedente próximo, tanto en el tiempo como en el espacio, a la formación de nuestro sistema solar. Según creen los astrónomos, la secuencia de acontecimientos que culminan en la supernova podría ser la siguiente: la combustión de una estrella significa fundamentalmente la fusión de su hidrógeno y luego de sus átomos de helio; pues bien, las cenizas de estos fuegos, en forma de elementos más pesados —sílice y hierro, por ejemplo— van acumulándose en la zona central del astro. Cuando la masa de este núcleo de elementos muertos que ha dejado de generar calor y presión excede con mucho a la de nuestro sol, la inexorable fuerza de su peso la colapsa, con lo que pasa a ser, en materia de segundos, un cuerpo cuyo volumen se cifra tan sólo en millares de millas cúbicas. El nacimiento de este extraordinario objeto, la estrella de neutrones, es una catástrofe de dimensiones cósmicas. Aunque los detalles de este proceso y de otros semejantes son todavía oscuros es obvio que se observan en él todos los ingredientes de una colosal explosión nuclear. Las formidables cantidades de luz, calor y radiaciones duras que produce una supernova en pleno apogeo igualan al total de los generados por todas las demás estrellas

de la galaxia. Las explosiones raramente son cien por cien eficaces: cuando una estrella se convierte en supernova, el material explosivo nuclear, que incluye uranio y plutonio junto a grandes cantidades de hierro y otros elementos residuales, es esparcido por el espacio como si se tratara de la nube de polvo provocada por la detonación de una bomba de hidrógeno. Lo más raro quizá sobre nuestro planeta es que consiste sobre todo en fragmentos procedentes de la explosión de una bomba de hidrógeno del tamaño de una estrella. Todavía hoy, eones después, la corteza terrestre conserva el suficiente material explosivo inestable para que sea posible la repetición, a muy pequeña escala, del acontecimiento original.

Las estrellas binarias —dobles— son muy corrientes en nuestra galaxia; pudiera ser que en un determinado momento, el Sol, esa estrella tranquila y de buenas maneras, haya tenido una compañera de gran tamaño que, al consumir su hidrógeno rápidamente, se convirtió en una supernova o, tal vez, el Sol y sus planetas proceden de la condensación de los restos de una supernova mezclados con el polvo y los gases interestelares. Sí parece seguro que, ocurriera como ocurriera, nuestro sistema solar se formó a resultas de la explosión de una supernova. No hay otra explicación verosímil para la gran cantidad de átomos explosivos aún presentes en la Tierra. El más primitivo y anticuado de los contadores Geiger nos indica que habitamos entre los restos de una vasta detonación nuclear. No menos de tres millones de átomos inestables procedentes de aquel cataclismo se fragmentan cada minuto dentro de nuestros cuerpos, liberando una diminuta fracción de la energía proveniente de aquellos remotos fuegos.

Las reservas actuales de uranio contienen únicamente el 0,72% del peligroso isótopo U235. Créase o no, los reactores nucleares han existido mucho antes que el hombre: recientemente fue descubierto en Gabón (África), un reactor natural fósil que funcionaba desde hace aproximadamente dos eones. Podemos, por consiguiente, afirmar casi con toda seguridad que, hace cuatro eones, la concentración geoquímica del uranio produjo espectaculares reacciones nucleares naturales. Al estar hoy tan de moda denigrar la tecnología, es fácil olvidar que la fusión nuclear es un proceso natural. Si algo tan intrincado como la vida puede surgir por accidente, no debe maravillarnos que con un reactor de fusión, mecanismo relativamente simple, ocurra algo parecido.

Así pues, la vida empezó probablemente bajo condiciones de radiactividad mucho más intensas que las que tanto preocupan a ciertos medioambientalistas de hoy. Más aún, el aire no contenía oxígeno libre ni ozono, lo que dejaba la superficie del planeta expuesta directamente a la intensa radiación ultravioleta del Sol. Preocupa mucho actualmente el que los imponderables de la radiación nuclear y de la ultravioleta puedan causar un día la destrucción de toda la vida sobre la Tierra y, sin embargo, estas mismas energías inundaron la matriz misma de la vida.

No se trata aquí de paradojas; los peligros actuales son ciertos pero se tiende a exagerarlos. La radiación ultravioleta y la nuclear son parte de nuestro entorno natural y siempre lo han sido. Cuando la vida comenzaba, el poder destructor de la radiación nuclear, su capacidad para romper enlaces, puede haber sido incluso benéfica, acelerando el proceso

de prueba y error al eliminar los errores y regenerar los componentes químicos básicos, siendo causa sobre todo de una mayor producción de combinaciones fortuitas de entre las que surgiría la óptima.

Como Urey* nos enseña, la atmósfera primigenia de la Tierra pudo haber desaparecido durante la fase de estabilización del Sol, dejando nuestro planeta tan desnudo como la Luna lo está ahora. Posteriormente, la presión de la masa terrestre y la confinada energía de componentes altamente radiactivos caldearon su interior, produciendo el escape de gases y de vapor de agua que daría lugar al aire y a los océanos. Desconocemos cuanto tardó en producirse esta atmósfera secundaria y la naturaleza de sus componentes originales, pero suponemos que en la época del inicio de la vida los gases procedentes del interior eran más ricos en hidrógeno que los que ahora expulsan los volcanes. Los compuestos orgánicos, las partes constituyentes de la vida, necesitan tener en su medio una cierta cantidad de hidrógeno tanto para su formación como para su supervivencia.

Cuando consideramos los elementos que entran en los compuestos orgánicos pensamos habitualmente y en primer lugar en carbono, nitrógeno, oxígeno y fósforo, luego en una miscelánea de los elementos presentes en pequeñas cantidades, como el hierro, el zinc y el calcio. El hidrógeno, ese ubicuo material del que está hecha la mayor parte del Universo suele darse por supuesto y, sin embargo, su importancia y su versatilidad son máximas. Es parte esencial de todo compuesto formado por los demás elementos claves de la vida. Es el combustible del que se sirve el Sol y, consiguientemente, la fuente primitiva de ese generoso flujo de energía solar gratuita que pone en marcha los procesos vitales y les permite un desarrollo normal. Constituye las dos terceras partes del agua, esa otra substancia esencial para la vida y que tendemos a olvidar de tan frecuente. La abundancia de hidrógeno libre de un planeta configura el potencial de oxidación-reducción (redox), que mide la tendencia de un determinado entorno a oxidar o a reducir. Los elementos de un entorno oxidante incorporan oxígeno, razón de la herrumbre del hierro. En un ambiente reductor —rico en hidrógeno— un compuesto que contenga oxígeno tiende a cederlo. La abundancia de átomos de hidrógeno, cargados positivamente, determina también la acidez o la alcalinidad —el pH, diría un químico— de un medio. El potencial redox y el pH son dos factores ambientales claves para saber si un planeta puede contener vida o no.

El vehículo espacial Viking, norteamericano, que descendió en Marte, y el Venera soviético llegado a Venus han coincidido en informar negativamente respecto a la presencia de vida. Venus ha perdido casi todo su hidrógeno y es, en consecuencia, absolutamente estéril. En Marte hay aún algo de agua —e hidrógeno, por tanto— pero la oxidación de su superficie es tal que la formación de moléculas orgánicas es imposible. Los planetas están, además de muertos, incapacitados para la vida.

Aunque es poco lo que sabemos de la química terrestre cuando se inició

* Urey, Harold Clayton: Científico que en 1934 obtuvo el premio Nobel de Química por su descubrimiento del deuterio. Sus puntos de vista sobre la formación del sistema solar están contenidos en *The Planets: Their Origin and Development* (1952). (N. del T.).

la vida, nos consta que estaba más cercana a la actual de los gigantes exteriores, Júpiter y Saturno, que a la de Marte y Venus. Es probable que, hace eones, Marte, Venus y la Tierra fueran planetas ricos en moléculas de metano, hidrógeno, amoníaco y agua a partir de las que puede formarse la vida, pero del mismo modo que el hierro se cubre de herrumbre y la goma se deshace, un planeta se marchita y termina por quedar totalmente yermo (auxiliado del tiempo, ese gran oxidante) cuando el hidrógeno, elemento esencial para la vida, escapa al espacio.

La atmósfera de la Tierra que fue testigo del comienzo de la vida hubo de ser, por lo tanto, una atmósfera reductora, rica en hidrógeno. Esta atmósfera no necesitaba un gran contenido de hidrógeno libre por cuanto el que se desprendía del interior ofrecía un suministro constante; habría bastado, por otra parte, la presencia de hidrógeno en compuestos tales como el amoníaco y el metano. En las lunas de los planetas exteriores pueden encontrarse todavía atmósferas similares a la descrita; si sus débiles campos gravitacionales las retienen es gracias a lo bajo de sus temperaturas. A diferencia de estas lunas y de sus planetas, la Tierra, Marte y Venus carecen de las temperaturas o de las fuerzas gravitatorias necesarias para retener indefinidamente su hidrógeno sin auxilio biológico. El átomo de hidrógeno es el más pequeño y ligero de todos, por lo que, sea cual sea la temperatura, siempre es el de movimiento más veloz; pues bien, teniendo en cuenta que los rayos solares fragmentan las moléculas de hidrógeno gaseoso situadas en el límite externo de nuestra atmósfera convirtiéndolas en átomos libres, cuya movilidad les permite escapar de la atracción gravitatoria y perderse en el espacio, está claro que la vida en la Tierra habría tenido los días contados si el suministro de hidrógeno (incorporado a compuestos tales como amoníaco y metano) hubiera dependido sólo de los gases escapados del interior del planeta, incapaces de reponer las pérdidas indefinidamente. Estos gases, además, cumplían otra misión fundamental, la de "arropar" nuestro planeta manteniendo su temperatura en una época en la que, probablemente, la radiación solar era inferior a la actual.

La historia del clima terrestre es uno de los argumentos de más peso en favor de la existencia de Gaia. Sabemos por las rocas sedimentarias que durante los tres últimos eones y medio el clima no ha sido nunca, ni siquiera durante períodos cortos, totalmente desfavorable para la vida. Esa continuidad del registro geológico de la vida nos indica también la imposibilidad de que los océanos llegaran a hervir o a congelarse en algún momento. Hay, por el contrario, pruebas sutiles derivadas de las proporciones entre las diferentes formas atómicas de oxígeno encontradas en los estratos geológicos cuya interpretación indica que el clima ha sido siempre muy parecido a como es ahora, con las salvedades de las glaciaciones y del período próximo al comienzo de la vida, donde se hizo algo más cálido. Los períodos glaciales —suele denominárseles Edades de Hielo, frecuentemente exagerando— afectaron tan sólo las zonas terrestres situadas por encima de los 45° Norte y por debajo de los 45° Sur: el 70 por ciento de la superficie terrestre queda, sin embargo, entre estas dos latitudes. Las así llamadas Edades de Hielo afectaron únicamente a la flora y la fauna que habían colonizado el 30 por ciento

restante, que hasta en los períodos interglaciales suele estar parcialmente helado. Como lo está hoy.

Parecería que en principio no hay nada particularmente extraño en este cuadro de un clima estable a lo largo de los tres y medio últimos eones. Si la Tierra gira según una órbita estable alrededor del Sol, ese radiador gigantesco y permanente, desde época tan remota, ¿por qué habría de ser de otro modo? Es, sin embargo, extraño, y precisamente por esta razón. Nuestro Sol, estrella típica, se ha desarrollado según un patrón estándar bien establecido, por el cual sabemos *que* su energía radiante ha aumentado al menos en un 30 por ciento durante los tres eones y medio mencionados. Un 30 por ciento menos de calor solar implica una temperatura media para la Tierra muy por debajo del punto de congelación del agua. Si el clima de la Tierra estuviera exclusivamente en función de la radiación solar nuestro planeta habría permanecido congelado durante el primer eón y medio del período caracterizado por la existencia de vida, y sabemos por los registros paleontológicos y por la persistencia misma de la vida que jamás las condiciones ambientales fueron tan adversas.

Si la Tierra fuera simplemente un objeto sólido inanimado, su temperatura de superficie seguiría las variaciones de la radiación solar, y no hay ropaje aislado que proteja indefinidamente a una estatua de piedra del calor veraniego y del frío invernal; durante tres eones y medio la temperatura de superficie ha sido permanentemente favorable para la vida, de modo semejante a como la temperatura de nuestros cuerpos se mantiene constante en invierno y en verano, ya sea tropical o polar el entorno en el que nos encontremos. Aunque podría pensarse que la intensa radiactividad de los primeros días habría bastado para mantener unos ciertos niveles de temperatura, un sencillo cálculo basado en la muy predecible naturaleza de la desintegración radiactiva indica que, aunque estas energías mantenían incandescente el interior del planeta, tuvieron escaso efecto sobre las temperaturas superficiales. Los científicos dedicados a cuestiones planetarias han sugerido varias explicaciones para lo constante de nuestro clima. Cari Sagan y su colaborador el doctor Mullen, por ejemplo, han señalado recientemente que, en épocas remotas, cuando el Sol brillaba con menos intensidad, la presencia en la atmósfera de gases como el amoníaco ayudaba a conservar el calor recibido. Algunos gases, como el dióxido de carbono y el amoníaco absorben la radiación térmica infrarroja que desprende la superficie de la Tierra y retrasan su escape al espacio: son los equivalentes gaseosos de la ropa de abrigo, aunque tienen sobre ésta la ventaja adicional de ser transparentes a las radiaciones solares que hacen llegar a nuestro planeta casi todo el calor que recibe. Por esta razón, aunque quizá no del todo correctamente, son a menudo denominados gases "invernadero".

Otros científicos, especialmente el profesor Meadows y Henderson Sellers, de la Universidad de Leicester, han sugerido que, en épocas anteriores, la superficie terrestre era de color más oscuro, capaz por consiguiente de absorber en mayor proporción que ahora el calor del Sol. La parte de luz solar reflejada al espacio se conoce como el albedo o blancura de un planeta. Si su superficie es totalmente blanca reflejará toda

la luz solar que a ella llegue resultando, por lo tanto, un mundo muy frío. Si, por el contrario, es completamente negra, absorbe dicha luz en su totalidad, con el consiguiente aumento de la temperatura. Es evidente que un cambio del albedo podría compensar el menor rendimiento térmico de un Sol más apagado. La superficie terrestre ostenta en nuestra época una adecuada coloración intermedia y está cubierta por masas de nubes en aproximadamente el 50 por ciento. Refleja más o menos el 45 por ciento de la luz procedente del Sol.

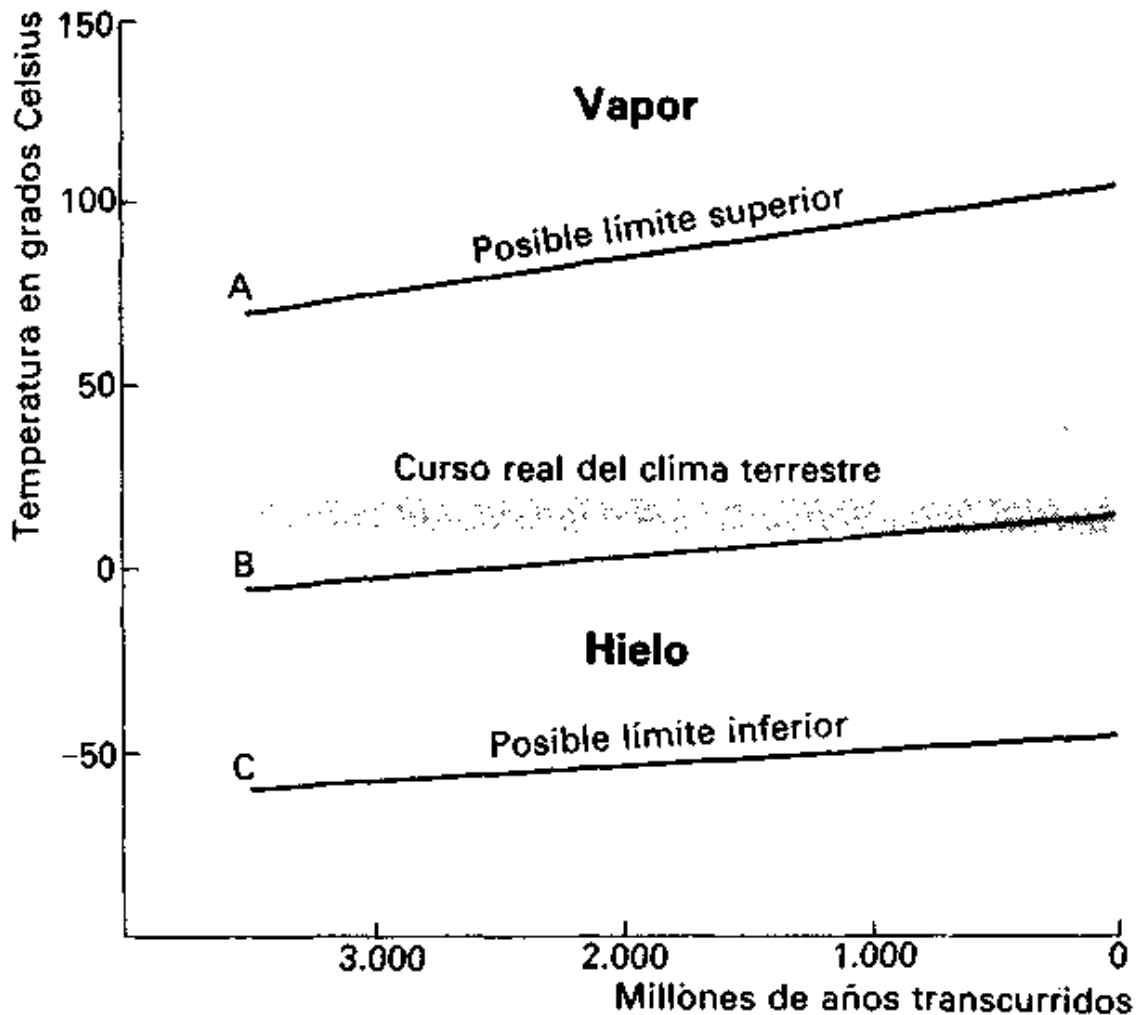


Fig. 1. El curso de la temperatura de la Tierra desde los comienzos de la vida, hace 3,5 eones, se mantiene siempre dentro del estrecho margen que dejan las líneas horizontales de los 10° y los 20°C. Si nuestra temperatura planetaria hubiera dependido únicamente de la relación abiológica establecida entre la radiación solar y el balance térmico atmósfera-superficie, podrían haberse alcanzado las condiciones externas marcadas por las líneas A y C. De haber sucedido esto toda vida habría desaparecido del planeta, lo que también habría sucedido si las temperaturas hubieran seguido el curso intermedio marcado por la línea B, que muestra cómo habrían aumentado de haber seguido pasivamente el incremento de radiación solar.

Cuando la vida empezaba, pues, el clima era suave a pesar de la menor radiación solar. Las únicas explicaciones que se han dado a este fenómeno son a un "efecto invernadero" protector del dióxido de carbono y del amoníaco o un menor albedo originado por una distribución de las masas de tierra diferente a la actual. Ambas son posibles, pero únicamente hasta

cierto punto: allí donde no llegan es donde vislumbramos por primera vez a Gaia o, al menos, la necesidad de postular su existencia.

Parece probable que las primeras manifestaciones de la vida se instalaran en los océanos, en las aguas someras, en los estuarios, en las riberas de los ríos y en las zonas pantanosas, extendiéndose desde aquí a todas las demás áreas del globo. Al cobrar forma la primera biosfera, el entorno químico de la Tierra comenzó inevitablemente a cambiar. Del mismo modo que los nutrientes de un huevo de gallina alimentan al embrión, los abundantes compuestos orgánicos de los cuales surgió la vida suministraron a la joven criatura el alimento que su crecimiento requería. A diferencia del pollito, sin embargo, la vida más allá del "huevo" contaba únicamente con un suministro alimenticio limitado. Tan pronto como los compuestos clave empezaron a escasear, la joven criatura se encontró frente a la disyuntiva de perecer de hambre o de aprender a sintetizar sus propios elementos estructurales utilizando las materias primas a su alcance y la luz solar como energía motriz.

La necesidad de enfrentarse a alternativas de esta índole debió ser frecuente en la época que describimos y sirvió para incrementar la diversificación, la independencia y la robustez de una biosfera en expansión. Quizá fuera este el momento de la aparición de las primeras relaciones depredador-presa, del establecimiento de primitivas cadenas alimentarias. La muerte y la natural descomposición de los organismos individuales liberaban componentes claves para el conjunto de la comunidad pero, para ciertas especies, pudo resultar más conveniente obtener estos compuestos fundamentales alimentándose de otros seres vivos. La ciencia de la ecología se ha desarrollado al punto de que actualmente puede demostrar, con la ayuda de modelos numéricos y computadores, que un ecosistema compuesto por una compleja red trófica, por muy diferentes relaciones depredador-presa, es mucho más sólido y estable que una sola especie autocontenida o que un pequeño grupo de interrelación escasa. Si tales aseveraciones son ciertas, parece probable que la biosfera se diversificara con rapidez según iba desarrollándose.

Consecuencia importante de esta incesante actividad de la vida fue la circulación cíclica del amoníaco, el dióxido de carbono y el metano, gases atmosféricos todos ellos, a través de la biosfera. Cuando el suministro de otras fuentes escaseaba, estos gases aportaban carbono, nitrógeno e hidrógeno, elementos imprescindibles para la vida; de ello resultaba un descenso en su tasa atmosférica. El carbono y el nitrógeno fijados descendían a los lechos marinos en forma de detritos orgánicos o bien eran incorporados a los organismos de los primitivos seres vivos como carbonato de calcio o de magnesio. Parte del hidrógeno que la descomposición del amoníaco liberaba se unía a otros elementos —principalmente al oxígeno para formar agua— y parte escapaba al espacio en forma de hidrógeno gaseoso. El nitrógeno procedente del amoníaco quedaba en la atmósfera como nitrógeno molecular, forma prácticamente inerte que no ha cambiado desde entonces.

Aunque estos procesos pueden resultar lentos para nuestra escala temporal, mucho antes de que un eón transcurriera completamente, la gradual utilización del carbónico y del amoníaco de la atmósfera había

introducido considerables cambios en la composición de ésta. El que estos gases fueran desapareciendo de la atmósfera produjo además un descenso de la temperatura debido al debilitamiento del "efecto invernadero". Sagan y Mullen han propuesto que quizá fuera la biosfera la encargada de mantener el *status quo* climatológico aprendiendo a sintetizar y a reemplazar el amoníaco que utilizaba como nutriente. Si están en lo cierto, tal síntesis hubiera sido la primera tarea de Gaia. Los climas son intrínsecamente inestables; tenemos ahora la casi total certeza gracias al meteorólogo yugoslavo Mihalanovich de que los períodos de glaciación recientes fueron consecuencia de cambios muy leves experimentados por la órbita de la Tierra. Para que se establezca una Edad de Hielo basta un decremento de tan sólo el 2% en el aporte calórico que recibe un hemisferio. Es ahora cuando empezamos a entrever las incalculables consecuencias que, para la joven biosfera, tuvo su propia utilización de los gases atmosféricos que arrojaban al planeta, en una época donde el rendimiento calorífico del Sol era inferior al actual no en un dos, sino en un 30 por ciento. Pensemos en lo que podría haber ocurrido de producirse alguna perturbación añadida, leve incluso, tal como ese 2 por ciento de enfriamiento extra capaz de precipitar una glaciación: el descenso de temperatura haría a su vez disminuir el grosor de la capa amoniacal debido a que, con el enfriamiento, la superficie de los océanos absorberían mayores cantidades de este gas, decreciendo consiguientemente la cantidad disponible para la biosfera; la menor tasa de amoníaco del aire facilitaría el escape del calor del espacio, estableciéndose un círculo vicioso, un sistema de realimentación positiva que provocaría inexorablemente ulteriores descensos de la temperatura. Con la caída de ésta cada vez habría menos amoníaco en el aire y entonces, para colmo, llegando ya a temperaturas de congelación, la capa de nieve y hielo, cada vez más extensa, incrementaría vertiginosamente el albedo del planeta y por lo tanto la reflexión de la luz solar. Siendo ésta un 30 por ciento más débil se produciría de forma inevitable un descenso mundial de las temperaturas muy por debajo del punto de congelación. La Tierra habríase convertido en una helada esfera blanca, estable y muerta.

Si, por el contrario, la biosfera se hubiera excedido en su compensación del amoníaco tomado de la atmósfera sintetizando demasiado, habría tenido lugar una escalada de temperaturas, instaurándose, a la inversa, el mismo círculo vicioso: a mayor calor, más amoníaco en el aire y menos escape calorífico hacia el espacio. Con la subida de temperatura, más vapor de agua y más gases aislantes llegarían a la atmósfera, alcanzándose eventualmente unas condiciones planetarias parecidas a las de Venus, aunque con menos calor. La temperatura de la Tierra sería finalmente de unos 100° C, muy por encima de lo que la vida puede tolerar: de nuevo tendríamos un planeta estable pero muerto.

Puede que el proceso natural realimentado negativamente de formación de nubes o algún otro fenómeno hasta hoy ignorado se encargaran quizá de mantener un régimen al menos tolerable para la vida, pero de no ser así, la biosfera tuvo que aprender mediante prueba y error el arte de controlar su entorno, fijando inicialmente límites amplios y luego, con el refinamiento fruto de la práctica, manteniendo sus condiciones lo más cerca

posible de las óptimas para la vida. Tal proceso no consistía solamente en fabricar la cantidad necesaria de amoníaco para restituir el consumido; era también preciso poner a punto medios apropiados para apreciar la temperatura y el contenido de amoníaco del aire a fin de mantener en todo momento una producción adecuada. El desarrollo de este sistema de control activo —con todas sus limitaciones—, por parte de la biosfera pudo ser quizá la primera indicación de que Gaia había por fin surgido del conjunto de sus partes.

Si consideramos, pues, la biosfera una entidad *capaz*, como la mayor parte de los seres vivos, de adaptar el entorno a sus necesidades, estos problemas climatológicos tempranos podrían haberse resuelto de muy diversas maneras. Gran número de criaturas gozan de la capacidad de modificar su coloración según convenga a diferentes propósitos de camuflaje, advertencia o exhibición: pues bien, al disminuir el amoníaco o aumentar el albedo (como consecuencia de redistribuciones de las masas de tierra) uno de los medios que pudo emplear la biosfera para mantener su temperatura fue el oscurecimiento. Awramik y Golubic de la Universidad de Boston han observado que, en los pantanos salobres donde el albedo es habitualmente alto, los cambios estacionales provocan el ennegrecimiento de "alfombras" compuestas por incontables microorganismos. ¿Podrían estos parches oscuros, producidos por una forma de vida de antigua estirpe, ser recordatorios vivos de un arcaico método para conservar el calor? Y a la inversa: si el problema fuera el sobrecalentamiento, la biosfera marina generaría una capa monomolecular aislante que cubriría la superficie de las aguas para controlar la evaporación. El neutralizar la evaporación en las zonas más calientes del océano tiene por propósito impedir una excesiva acumulación de vapor de agua en la atmósfera que propicie una escalada de la temperatura originada por la absorción de la radiación infrarroja.

Estos son ejemplos de hipotéticos mecanismos que la biosfera podría utilizar para mantener unas condiciones ambientales adecuadas. El estudio de sistemas más sencillos —colmena, seres humanos— indica que el mantenimiento de la temperatura es, probablemente, la resultante del funcionamiento de diferentes sistemas, más que el producto de la acción de uno solo.

La auténtica historia de tan remotos períodos no se sabrá jamás; todo lo que podemos hacer es especular basándonos en probabilidades y en la casi certidumbre de que el clima no fue nunca obstáculo para la vida. La primera manifestación de los cambios activos que la biosfera introducía en su entorno pudo haber estado relacionada con el clima y con la menor temperatura del Sol, pero en ese entorno había otras necesidades que atender, otros parámetros cuyo equilibrio era fundamental para la continuidad de la vida. Ciertos elementos básicos resultaban necesarios en grandes dosis mientras que, de otros, sólo se requerían cantidades vestigiales; en ocasiones era preciso un rápido reabastecimiento de todos ellos. Había que ocuparse de las sustancias de desecho, venenosas o no, aprovechándolas a ser posible; controlar la acidez, procurando el mantenimiento de una media en conjunto neutro o alcalino; la salinidad de los mares no debía aumentar en exceso, y así sucesivamente. Aunque

estos son los criterios básicos, hay otros muchos involucrados.

Como hemos visto, cuando se estableció el primer sistema viviente tenía a su alcance un abundante suministro de elementos clave, que posteriormente y al ir creciendo, aprendería a sintetizar utilizando materias primas tomadas del aire, el agua y el suelo. Otra tarea que la extensión y la diversificación de la vida exigía era asegurar el suministro ininterrumpido de los elementos vestigiales requeridos por diferentes mecanismos y funciones. Todas las criaturas vivientes celulares utilizan un extenso abanico de procesadores químicos —agentes catalíticos— denominados enzimas, muchas de las cuales requieren pequeñísimas cantidades de determinados elementos para desempeñar normalmente sus funciones. La anhidrasa carbónica, por ejemplo, enzima especializada en el transporte de dióxido de carbono desde y hacia el medio celular, tiene una composición donde entra zinc; otras enzimas precisan hierro, magnesio o vanadio. En nuestra biosfera actual se dan actividades que exigen la presencia de muchos otros elementos vestigiales: cobalto, selenio, cobre, yodo y potasio. Indudablemente, tales necesidades surgieron y fueron satisfechas en el pasado. Al principio estos elementos se obtenían de la forma habitual, extrayéndolos simplemente del entorno. Con la proliferación de la vida la competencia por ellos fue aumentando, se redujo su disponibilidad y en algunos casos su falta fue el factor que limitó ulteriores expansiones. Si, como parece probable, las aguas someras bullían de formas de vida primitivas, algunos elementos claves fueron apartados de la circulación porque, al morir, los organismos que los incorporaban se hundían, descendiendo hasta el depósito de lodo del lecho marino y, atrapados por otros sedimentos, no volvían a estar disponibles para la biosfera hasta que alguna conmoción de la corteza terrestre removía estos "cementorios" con la suficiente fuerza. En los grandes lechos de rocas sedimentarias hay sobradas pruebas de lo completo que podía llegar a ser este proceso de secuestro. La vida, sin duda, fue resolviendo este problema mediante el proceso evolutivo de prueba y error, hasta que apareció una especie de carroñeros especializada en extraer estos elementos esenciales de los cadáveres de otros organismos, impidiendo su sedimentación. Otros sistemas posiblemente utilizados quizá se sirvieran de complejas redes fisicoquímicas usadas para llevar a cabo procesos de salvamento —siempre de dichas sustancias claves— que, si bien al principio eran individuales, poco a poco fueron coordinándose en estructuras globales a fin de obtener un mayor rendimiento. La más compleja ostentaba poderes y propiedades superiores a la suma de sus partes, lo que la caracterizaba como uno de los rostros de Gaia.

Nuestra sociedad se ha enfrentado, desde la Revolución Industrial, con arduos problemas químicos derivados de la escasez de determinadas materias primas o relacionados con la contaminación local: la biosfera incipiente debió encarar problemas similares. El primer sistema celular que se las ingenió para extraer zinc de su entorno, inicialmente en su exclusivo beneficio y después en bien de la comunidad, quizá acumulara al mismo tiempo mercurio, elemento que a pesar de su semejanza con el zinc es venenoso. Los errores de esta naturaleza fueron probablemente origen de los primeros incidentes provocados por la contaminación en la historia del

mundo. Como de costumbre, fue la selección natural la encargada de solventar esta cuestión: existen actualmente sistemas de microorganismos capaces de transformar el mercurio y otros elementos venenosos en derivados volátiles mediante metilación; estas asociaciones de microorganismos quizá representen la forma más antigua de tratar residuos tóxicos.

La contaminación no es, como tan a menudo se afirma, producto de la baja moral, sino que constituye una consecuencia inevitable del desenvolvimiento de la vida. La segunda ley de la termodinámica establece claramente que el bajo nivel de entropía y la intrincada organización dinámica de un sistema viviente exigen necesariamente la excreción al entorno de productos y energía degradados. La crítica está justificada únicamente si somos incapaces de encontrar respuestas limpias y satisfactorias a los problemas que, a más de solventarlos, los pongan de nuestra parte. Para la hierba, los escarabajos y hasta los granjeros, el estiércol de vaca no es contaminación, sino don valioso. En un mundo sensato, los desechos industriales no serían proscritos, sino aprovechados. Responder negativa, destructivamente, prohibiéndolos por ley, parece tan idiota como legislar contra la emisión de boñigas por parte de las vacas.

Una de las amenazas más serias con que se enfrentaba la joven biosfera la constituía el conjunto de crecientes alteraciones que afectaban a las propiedades del entorno planetario. El consumo de amoníaco —gas primordial— realizado por la biosfera repercutía no sólo en las propiedades radiantes de la atmósfera, sino también en el equilibrio de la neutralidad química: a menos amoníaco, mayor acidez. Como la conversión de metano a dióxido de carbono y de sulfuros a sulfatos significaba un incremento adicional de la acidez, ésta podría haberse hecho tan intensa como para impedir la vida. Desconocemos la solución concreta del problema, pero remontándonos todo lo atrás que nuestros sistemas de medida permiten, hay pruebas de que la Tierra ha estado siempre próxima a ese estado de neutralidad química. Marte y Venus, por el contrario, muestran un alto grado de acidez en su composición, a todas luces excesivo para permitir vida tal como se ha desarrollado en nuestro planeta. En la actualidad, la biosfera produce hasta 1.000 megatoneladas de amoníaco cada año, cantidad cercana a la necesaria para neutralizar los fuertes ácidos sulfúrico y nítrico derivados de la oxidación natural de compuestos sulfurosos y nitrogenados. Quizá se trate de una coincidencia, pero posiblemente sea otro eslabón en la cadena de pruebas circunstanciales en favor de la existencia de Gaia.

La regulación estricta de la salinidad de mares y océanos es tan esencial para la vida como la necesidad de neutralidad química, si bien es asunto mucho más extraño y complicado que ésta, como veremos en el capítulo 6. La recién estrenada biosfera, sin embargo, se hizo experta en esta muy crítica operación de control, como en tantas otras. La conclusión parece inmediata: si Gaia existe, la necesidad de regulación era tan urgente en el amanecer de la vida como en cualquier otra época posterior.

Un gastado lugar común afirma que las primeras manifestaciones de vida estaban aherrajadas por el bajo nivel de la energía disponible y que la evolución no se puso verdaderamente en marcha hasta la aparición del

oxígeno en la atmósfera, origen, en última instancia, del abigarrado muestrario de seres vivos hoy existente. Pues bien, hay pruebas directas de una biota compleja y variada que ya contenía todos los ciclos ecológicos principales establecida antes de la aparición de los animales esqueléticos durante el primer período —el Cámbrico— de la Era Paleozoica. Ciertamente es que la combustión celular de materia orgánica resulta una excelente fuente de energía para las criaturas móviles de gran tamaño como nosotros mismos y otros animales, pero no hay ya razón bioquímica por la cual la energía tenga que escasear en un entorno reductor, rico en hidrógeno y en moléculas portadoras de hidrógeno: veamos, por consiguiente, cómo el asunto de la energía pudo haber funcionado al revés.



Fig. 2. Colonia de estromatolitos en una playa de Australia del Sur. Su estructura es muy semejante a la que muestran los restos fósiles de colonias similares, cuya edad se cifra en 3.000 millones de años. Foto de P. F. Hoffman, proporcionada por M. R. Walter.

Ciertas formas de vida muy primitivas han dejado unas impresiones fósiles denominadas estromatolitos; se trata de estructuras biosedimentarias, a menudo laminadas, con forma de cono o de coliflor y habitualmente compuestas de carbonato de calcio o sílice. Son considerados en la actualidad productos de actividad microorgánica. Algunos se han encontrado en rocas pétreas cuya edad supera los tres eones; su forma sugiere que las producían fotosintetizadores como las algas azulverdes de hoy, que convierten la luz solar en energía química potencial. Es prácticamente seguro que algunas de las primeras formas de vida realizaban fotosíntesis, ya que no existe una fuente de energía cuya intensidad, constancia y abundancia sean equiparables a las de la energía solar. La fuerte radiactividad entonces reinante tenía el potencial

necesario, pero su volumen era una simple bagatela comparándolo con el flujo de energía solar.

Es probable que, como hemos visto, el entorno de los primeros fotosintetizadores fuera reductor, rico en hidrógeno y en moléculas portadoras de hidrógeno. Para atender a sus diferentes necesidades, las criaturas que en él vivían quizá generaran un gradiente químico tan importante como el de las plantas actuales. La diferencia estribaría en que hoy el oxígeno es extracelular y las sustancias nutritivas, más los compuestos ricos en hidrógeno, se hallan dentro de la célula, mientras en la época que nos ocupa pudo ser a la inversa. Para ciertas especies primigenias, las sustancias nutritivas podrían haber sido oxidantes, no necesariamente oxígeno libre, del mismo modo que las células de hoy no se alimentan de hidrógeno, sino de sustancias tales como los ácidos grasos poliácetilénicos, que liberan gran cantidad de energía cuando reaccionan con el hidrógeno. Ciertos microorganismos del suelo producen aún extraños compuestos de esta índole, que son los análogos de las grasas donde almacenan energía las células de hoy. Esta hipotética bioquímica a la inversa quizá nunca tuviera existencia real. Lo importante es que los organismos con capacidad para convertir la energía solar en energía química almacenada contaban después con potencia sobrada para, incluso en una atmósfera reductora, realizar la mayor parte de los procesos bioquímicos.

El registro geológico muestra que, durante las etapas iniciales de la vida, fueron oxidadas grandes cantidades de rocas superficiales en cuya composición entraba el hierro. Esto podría ser prueba de que la biosfera original producía hidrógeno, manteniendo una tasa atmosférica de este gas y sus compuestos —amoníaco por ejemplo— suficiente para determinar el escape de hidrógeno al espacio. Ycas, en una carta a *Nature*, ha comentado oportunamente la necesidad de recurrir a la intervención biológica para explicar las grandes cantidades de hidrógeno escapadas de la Tierra.

Eventualmente, hace quizá dos eones, los compuestos reductores de la corteza empezaron a oxidarse con mayor rapidez de lo que eran expuestos geológicamente, mientras la continua actividad de los fotosintetizadores aerobios iba acumulando oxígeno en el aire. Este fue probablemente el período más crítico de toda la historia de la vida sobre la Tierra: el abundante oxígeno gaseoso en el aire de un mundo anaerobio debe haber sido el peor episodio de contaminación atmosférica que este planeta ha conocido jamás. Imaginemos el efecto que sobre nuestra biosfera contemporánea produciría la colonización de los mares por un alga especializada en producir cloro gaseoso a partir del abundante ion de las aguas marinas y la energía de la luz solar. El devastador efecto que sobre toda la vida contemporánea tendría una atmósfera saturada de cloro no sería peor que el impacto causado por el oxígeno sobre la vida anaerobia de hace unos dos eones.

Esta era trascendental marcó también el final de la capa de amoníaco que, como anteriormente señalábamos, constituía un excelente medio para mantener la temperatura del planeta. El oxígeno libre y el amoníaco reaccionan en la atmósfera, limitando la máxima cantidad posible del

segundo, cuya cantidad fue descendiendo hasta llegar a la concentración actual, una parte por cada cien millones, porcentaje demasiado pequeño para ejercer ninguna influencia útil sobre la absorción infrarroja, aunque, como hemos visto, incluso en tales cantidades neutraliza eficazmente la acidez, inevitable subproducto de la oxidación; cumple, pues, la función de impedir que la acidez del entorno aumente hasta niveles incompatibles con la vida.

Cuando hace dos eones el aire empezó a albergar cantidades apreciables de oxígeno, la biosfera se asemejaba a la tripulación de un submarino averiado, donde todas las manos son necesarias para reparar los daños, mientras la concentración de gases venenosos crece segundo a segundo. Triunfó el ingenio y se conjuró el peligro, aunque no al modo humano, restaurando el viejo orden, sino al flexible modo de Gaia, adaptándose al cambio y convirtiendo al letal intruso en amigo inseparable.

La primera aparición de oxígeno en el aire significó una catástrofe casi fatal para la vida primitiva. El haber evitado por mera casualidad una muerte que pudo llegar como consecuencia de la ebullición, la congelación, el hambre, la acidez, las alteraciones metabólicas graves y finalmente el envenenamiento parece demasiado; pero si la joven biosfera era ya algo más que un simple catálogo de especies y controlaba ya el entorno planetario, nuestra supervivencia a despecho de las adversidades es menos difícil de comprender.

3. El reconocimiento de Gaia

Imaginemos una playa: Probablemente pensaremos en doradas extensiones de arena fina a las que llega un oleaje tranquilo, donde cada grano tiene su sitio y en las que nada parece ocurrir. Raramente, sin embargo, son las playas esos lugares idílicos e inmutables, al menos no durante mucho tiempo seguido. Las mareas y los vientos agitan incansablemente sus arenas, si bien es cierto que hasta aquí podemos hallarnos todavía en un mundo cuyos cambios se circunscriben a los perfiles de las dunas y a las figuras cinceladas por los flujos y reflujos de las aguas. Supongamos que en el horizonte, por otra parte inmaculado de nuestra playa, aparece una manchita. Inspeccionándola más de cerca descubrimos que se trata de un apilamiento arenoso obra, inequívocamente, de un ser vivo: vemos ahora, con total claridad, que se trata de un castillo de arena. Su estructura de conos truncados superpuestos revela que la técnica constructiva empleada ha sido la del cubo. El foso y el puente levadizo, con su rastrillo grabado que, con el secado de la arena empieza ya a desvanecerse, son también típicos. Estamos, por así decir, programados para reconocer instantáneamente la mano humana en un castillo de arena, pero si hicieran falta pruebas adicionales de que este apilamiento arenoso no es un fenómeno natural, habríamos de señalar que no se ajusta a las condiciones de su entorno. Las olas han hecho del resto de la playa una superficie perfectamente lisa, mientras que el castillo se yergue aún, orgullosamente, sobre ella; además, hasta la fortaleza construida por un niño tiene una complejidad de diseño y muestra una deliberación tales como para descartar desde el primer momento la posibilidad de que sea una estructura debida a fuerzas naturales.

Hasta en este sencillo mundo de playas y castillos de arena hay cuatro estados nítidamente diferentes: el estado inerte de neutralidad amorfa y completo equilibrio, (sin existencia real mientras el Sol brille proporcionando la energía precisa para mantener el aire y el mar en movimiento, que se encargarán a su vez de desplazar los granos de arena); el estado "de régimen permanente" estructurado, pero aún inerte, de una playa de arena rizada y de dunas apiladas por el viento; la playa que, con el castillo de arena, exhibe un signo de vida, y el estado, finalmente, en el cual la vida hace acto de presencia bajo la forma del constructor del castillo.

El tercer orden de complejidad, el representado por el castillo de arena, situado en un lugar intermedio con relación al estado abiológico de régimen permanente, por una parte, y al estado que incorpora la vida por otra, es importante en nuestra búsqueda de Gaia. Aunque en sí mismas inertes, las construcciones realizadas por un ser vivo contienen un verdadero caudal de información sobre las necesidades e intenciones de su constructor. Las señales de la existencia de Gaia son tan efímeras como nuestro castillo de arena. Si sus asociados vitales no realizaran una continua labor de reparación y recreación, del mismo modo que los niños levantan una y otra vez sus castillos, toda huella de Gaia pronto

desaparecería.

¿Cómo es posible entonces identificar las manifestaciones de Gaia distinguiéndolas de las estructuras fortuitas producto de las fuerzas naturales? Y, en cuanto a la presencia de la misma Gaia, ¿cómo la reconocemos? Por suerte no estamos totalmente desprovistos, como los enloquecidos cazadores del Snark, de mapas o de medios de identificación; contamos con algunas indicaciones. A finales del siglo pasado, Boltzman redefinió elegantemente la entropía diciendo que era la medida de la probabilidad de una distribución molecular. Esta definición, que quizá al principio pueda parecer oscura, nos conduce directamente a lo que buscamos. Implica que, allí donde aparezca un agrupamiento molecular altamente improbable, existirá casi con certeza la vida o algunos de sus productos; si esa distribución es de índole global, quizá estemos siendo testigos de alguna manifestación de Gaia, la criatura viviente más grande de la Tierra.

Pero ¿qué es, podrías decir, una distribución improbable de moléculas? A esta pregunta hay muchas respuestas posibles, entre ellas algunas no demasiado aclaratorias, como por ejemplo que es una distribución de moléculas improbables (como, tú, lector), o bien una distribución improbable de moléculas comunes (como, por ejemplo, el aire). Más general y más útil (para nuestra búsqueda) es definirla como una distribución cuyas diferencias con el estado de fondo tienen importancia bastante para conferirle entidad propia. Otra definición general señala que una distribución molecular improbable es aquella que, para su constitución, requiere un dispendio de energía por parte del trasfondo de moléculas en equilibrio. (Del mismo modo que nuestro castillo es reconociblemente diferente de su uniforme fondo; la medida en la que es diferente o improbable expresa la disminución entrópica, la deliberada actividad vital que representa).

Vemos, por lo tanto, cómo en Gaia se evidencian improbabilidades en la distribución de moléculas a escala global de características nítidas e indudablemente diferenciadas, tanto del estado de régimen permanente, como del equilibrio conceptual.

Será de utilidad que, para empezar, establezcamos claramente los pormenores de una Tierra, primero en estado de equilibrio y luego en el inerte estado de régimen permanente. Necesitamos también establecer qué se entiende por equilibrio químico.

El estado de desequilibrio es aquel del cual, al menos en principio, es posible extraer alguna energía, como cuando un grano de arena cae de un lugar más alto a otro más bajo. En el equilibrio, por el contrario, no existen estas diferencias, no hay energía disponible. En nuestro pequeño mundo de granos de arena las partículas fundamentales eran, efectivamente, idénticas o muy parecidas, pero el mundo real contiene más de un centenar de elementos químicos que pueden combinarse de muchas formas diferentes. Unos pocos —el carbono, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno, el fósforo y el azufre— se interrelacionan en número casi infinito de combinaciones. Son más o menos conocidas, sin embargo, las proporciones de todos los elementos del aire, el mar y las rocas de la superficie terrestre. Conocemos también la cantidad de energía liberada

cuando cada uno de estos elementos se combina con otro y cuando tales compuestos se combinan a su vez. Suponiendo, por tanto, que existe una fuente de alteración aleatoria y continua —el viento de nuestra playa— podemos calcular cuál será la distribución de los compuestos químicos cuando se alcanza el estado de mínima energía, en otras palabras el estado a partir del cual no hay reacción química que pueda producir energía alguna. Cuando realizamos este cálculo (naturalmente, con la ayuda de un computador) obtenemos unos resultados que son aproximadamente los que muestran la Tabla 1.

Sillen, el distinguido químico sueco, fue el primero en calcular cuál sería el resultado de llevar las sustancias de la Tierra hasta el equilibrio termodinámico, obteniendo unos resultados confirmados posteriormente por muchos otros.

Tabla 1. Comparación entre la composición de los océanos y el aire del mundo actual y la que tendrían en un hipotético mundo en equilibrio químico.

Componentes principales por ciento			
	Substancia	Mundo actual	Mundo En equilibrio
AIRE	Dióxido de carbono	0.03	99
	Nitrógeno	78	0
	Oxígeno	21	0
	Argón	1	1
OCÉANO	Agua	96	63
	Sal	3,5	35
	Nitrato sódico	vestigios	1,7

Es uno de esos ejercicios en los que, contando con la ayuda de un computador para realizar la tediosa parte de cálculo, la imaginación puede volar libremente. Para alcanzar el estado de equilibrio a escala de la Tierra, es necesario aceptar ciertos presupuestos formidablemente irreales: hemos de imaginar que el mundo ha sido de algún modo confinado dentro de un envoltorio aislante que, a modo de termo cósmico, lo mantiene a 15° C. Los componentes del planeta son entonces cuidadosamente mezclados hasta completar todas las reacciones químicas posibles, extrayendo la energía por ellas liberada para mantener constante la temperatura. El resultado final sería un mundo cubierto por una capa oceánica carente de todo oleaje, sobre la cual habría una atmósfera rica en dióxido de carbono y desprovista de oxígeno y nitrógeno. El mar, muy salado, tendría un lecho compuesto por sílice, silicatos y minerales cretáceos.

La composición química exacta y la configuración de nuestro imaginario mundo en equilibrio químico son menos importantes que la absoluta carencia de fuentes de energía: ni lluvia, ni olas o mareas, ni posibilidad de reacción química que produzca energía alguna. Es muy importante para nosotros entender que un mundo así —tibio, húmedo, con todo lo necesario a mano— nunca sería albergue de vida, imposible sin un continuo aporte de energía solar que la sustente.

Este abstracto mundo en equilibrio difiere significativamente de lo que podría ser una Tierra inerte: la Tierra, en primer lugar, continuaría girando sobre sí misma y alrededor del Sol, estando por consiguiente sometida a un poderoso flujo de energía radiante, capaz de descomponer moléculas en las capas más exteriores de la atmósfera. Tendría, además, una alta temperatura interior mantenida por la desintegración de elementos radiactivos procedentes de la cataclísmica explosión nuclear de cuyos restos se formó la Tierra. Habría nubes, lluvia y posiblemente pequeñas extensiones de tierra firme. Suponiendo el rendimiento solar actual, los casquetes polares probablemente no existieran, porque este mundo sin vida de régimen permanente contendría una gran cantidad de dióxido de carbono, perdiendo por ello el calor más lentamente que nuestro mundo real.

Un mundo inerte contaría con algo de oxígeno, procedente de la descomposición de moléculas de agua en las capas superiores de la atmósfera (los muy ligeros átomos de hidrógeno escaparían al espacio); la cantidad exacta, motivo de discusión, dependería del ritmo de aparición en superficie de materiales reductores subcorticales y de la cantidad de hidrógeno que regresara del espacio. Sabemos con seguridad, sin embargo, que de haber oxígeno, sería tan sólo en cantidad mínima, algo así como el contenido actualmente en Marte. Este mundo dispondría de energía cólica e hidráulica, pero la química sería sumamente escasa. No podría obtenerse nada ni remotamente parecido a un fuego. Aun suponiendo vestigios de oxígeno en la atmósfera, no habría nada que quemar en él, y si dispusiéramos de combustible, el oxígeno atmosférico necesario para prender algo es de un 12 por ciento, cantidad muy superior al pequeñísimo porcentaje de un mundo sin vida.

Aunque este mundo inerte es distinto al mundo en equilibrio, las diferencias entre ambos son insignificantes en relación a las obtenidas comparando cualquiera de ellos con nuestro mundo vivo de hoy. Las relativas a la composición química de aire, mar y tierra son materia de posteriores capítulos. Aquí nos interesa señalar que la energía química está disponible en cualquier punto de nuestro planeta actual, y que son pocos los lugares en los cuales es imposible encender fuego; en realidad, bastaría tan sólo un aumento de aproximadamente el 4 por ciento en el nivel atmosférico de oxígeno para poner al mundo en peligro de conflagración. Cuando el nivel de oxígeno alcanza el 25 por ciento, hasta la vegetación húmeda sigue ardiendo una vez que la combustión ha empezado, de tal modo que un bosque incendiado por un rayo seguiría quemándose ferozmente hasta que todo el material combustible hubiese sido consumido. Estos mundos de novela de ciencia ficción con estimulantes atmósferas ricas en oxígeno son eso, mundos de ficción: bastaría el descenso de la nave del protagonista para hacerlos arder como teas.

Mi interés por los fuegos y por la disponibilidad de energía química libre no se debe a ninguna extraña fijación o soterrada tendencia pirómana, sino a que, en términos químicos, la intensidad de la energía libre (la energía que proporciona una hoguera, por ejemplo) mide cuan diferente es lo que estudiamos. Sólo ella hace ya nuestro mundo (incluso sus áreas

desprovistas de vida) perfectamente distinguible del mundo en equilibrio y del mundo de régimen permanente. Los castillos de arena desaparecerían en un día de la Tierra si no hubiera niños para construirlos. Si la vida se extinguiera, la energía libre disponible para encender fuegos desaparecería tan pronto, comparativamente, como el oxígeno del aire. Tal proceso se cumpliría en aproximadamente un millón de años, lapso temporal insignificante para la vida de un planeta.

Lo fundamental, pues, de mi argumentación, es esto: de igual modo que los castillos de arena no son consecuencia accidental de fenómenos tales como el viento o las olas, naturales pero abiológicos, tampoco lo son los cambios químicos experimentados por la composición de la corteza terrestre que hacen posible la combustión ígnea. Podrías pensar, lector, que todo esto está muy bien: la idea de que muchas de las características abiológicas de nuestro mundo, como la posibilidad de encender fuego, son consecuencia directa de la presencia de vida está respaldada por un argumento convincente, pero ¿cómo nos ayuda esto a reconocer la existencia de Gaia? Mi respuesta es que, allí donde las situaciones de profundo desequilibrio, como la presencia de oxígeno y metano en el aire o de árboles en el suelo son de alcance global, estamos vislumbrando algo de tamaño planetario capaz de mantener inalterada una distribución molecular altamente improbable.

Los mundos inertes que he modelado para compararlos a nuestro mundo viviente están, obviamente, poco definidos: los geólogos podrían cuestionar la distribución de elementos y compuestos. Es, sin duda, tema abierto a discusión la cantidad de nitrógeno que contendría un mundo inerte. Sería particularmente interesante tener datos sobre el contenido de nitrógeno de Marte; saber si este gas ha escapado al espacio, como el profesor Me Elroy de Harvard ha sugerido, o si se halla en la superficie del planeta químicamente ligado a otros elementos (formando nitratos, por ejemplo). Marte podría ser muy bien el prototipo de un mundo de régimen permanente desprovisto de vida.

Consideremos ahora las otras formas de construir un mundo de esta índole y comparémoslas luego con el modelo ya discutido. Supongamos una total falta de vida en Marte y Venus e interpongamos entre ellos un hipotético planeta inerte que ocupara el lugar de la Tierra. Una buena forma de imaginar sus características fisicoquímicas respecto a sus vecinos sería hacerlo en términos de un país imaginario situado a mitad de camino entre Finlandia y Libia. La composición atmosférica de Marte, la Tierra, Venus y nuestro hipotético planeta abiológico está detallada en la Tabla 2.

La segunda forma es suponer que, una de esas profecías cuyo mensaje es el fin inminente de nuestro planeta, se hace realidad y que en la Tierra perece toda vida, hasta la última espora de la bacteria anaerobia más profundamente enterrada (no hay posibilidad alguna de que una devastación de tal grado se produzca, pero imaginemos que así ha sido). Para completar con propiedad el cuadro y seguir paso a paso los cambios del decorado químico durante la muerte de nuestro planeta, necesitamos idear un proceso que acabe con la vida sin alterar el entorno físico; dar con algo tan definitivo representa, a pesar de las profecías de muchos ecologistas, un problema prácticamente insoluble. Se habla de la amenaza

de los aerosoles para la capa de ozono; al desaparecer, nada impedirá que una avalancha de letal radiación ultravioleta procedente del sol "destruya completamente la vida sobre la Tierra". La eliminación total o parcial de la capa de ozono que envuelve a la Tierra tendría muy desagradables consecuencias para la vida tal como la conocemos. Muchas especies, incluyendo al hombre, padecerían daños y otras serían destruidas. Las plantas verdes, principales productoras de alimentos y oxígeno, sufrirían deterioro, pero se ha demostrado recientemente que ciertas especies de algas azulverdes, transformadoras primarias de energía en los tiempos antiguos y en las playas modernas, son extremadamente resistentes a las cortas ondas de la radiación ultravioleta. La vida de este planeta es una entidad recia, robusta y adaptable; nosotros no somos sino una pequeña parte de ella. Su fracción más esencial está constituida probablemente por el conjunto de criaturas que habitan los lechos de las plataformas continentales y que pueblan el suelo inmediatamente bajo la superficie. Los animales y las plantas de gran tamaño son relativamente irrelevantes; resultan quizá comparables a ese grupo de elegantes vendedores y modelos glamorosas que se encargan de presentar un producto. Pueden ser deseables pero no esenciales. Son los esforzados trabajadores microbianos del suelo. y los lechos marinos los que mantienen las cosas en marcha, y la opacidad de sus respectivos medios los pone a salvo de la más intensa radiación ultravioleta.

Tabla 2

Gas	Planeta			
	Venus	Tierra sin vida	Marte	Tierra tal como es
Dióxido de carbono	98%	98%	95%	0,03%
Nitrógeno	1,9%	1.9	2,7%	79%
Oxígeno	vestigios	vestigios	0,13%	21%
Argón	0,1%	0,1%	2%	1%
Temperaturas de superficie (en ° C)	477	290±50	—53	13
Presión total (en bares)	90 0309	60 0309	0064 3	1,0 5

Las radiaciones nucleares tienen posibilidades letales: si una estrella próxima se convierte en una supernova y explota ¿no esterilizará a la Tierra la intensa radiación cósmica? ¿Y que sucedería si, en el transcurso de una guerra total, el armamento nuclear es utilizado a discreción? Pues que, como en el caso anterior, la especie humana y los animales grandes se verían seriamente afectados, pero para la mayor parte de la vida unicelular tales acontecimientos ni siquiera se habrían producido. Se ha investigado repetidamente la ecología del atolón Bikini para ver si el alto

nivel de radiactividad consecuencia de las pruebas nucleares allí realizadas ha perjudicado la vida del arrecife coralino, comprobándose su escaso efecto, salvo donde la explosión había volado el suelo fértil dejando al descubierto la roca.

A finales de 1975, un comité formado por ocho miembros distinguidos de la Academia Nacional de Ciencias norteamericana, auxiliado por otros cuarenta y ocho científicos de reconocida competencia en materia de explosiones nucleares, publicó un informe donde se decía que si, con motivo de una guerra, se detonara la mitad de los arsenales nucleares del mundo —unos 10.000 megatones— los efectos sobre gran parte de los ecosistemas humanos del mundo sería pequeño al principio y despreciable en menos de treinta años. Tanto agresores como agredidos quedarían localmente devastados, pero las áreas alejadas de los blancos y los ecosistemas marinos y costeros, de especial importancia para la biosfera, sufrirían alteraciones mínimas.

Hasta la fecha, el informe sólo parece contener un punto susceptible de crítica y es su afirmación de que el principal efecto global sería la destrucción parcial de la capa de ozono debido a los óxidos de nitrógeno generados en el calor de sus explosiones nucleares. Sospechamos actualmente que esta aseveración es falsa, que los óxidos de nitrógeno no representan una amenaza demasiado importante para el ozono estratosférico. Cuando el informe se dio a conocer, Norteamérica experimentó una extraña y desproporcionada preocupación por la capa de ozono, porque si bien la extrapolación quizá termine resultando cierta, sigue siendo una especulación basada en pruebas muy débiles. Hoy por hoy, parece todavía que una guerra nuclear generalizada, aunque pavorosa para las naciones en conflicto y sus aliados, no supondría la total devastación tan a menudo descrita. Ciertamente no significaría gran cosa para Gaia. El informe fue criticado —lo es aún— moral y políticamente, y se calificó de irresponsable, alegándose su carácter estimulante para los planificadores militares más belicosos. Parece que eliminar la vida de nuestro planeta sin modificarlo físicamente es poco menos que imposible. Sólo nos quedan los supuestos ficticios: construyamos pues un apocalíptico decorado en el que toda la vida de la Tierra, hasta la última espora, haya sido eliminada.

El doctor Intensli Avid es un científico devoto que trabaja para una floreciente organización dedicada a la investigación agrícola, al que afectan sobremedida las pavorosas fotografías de niños hambrientos publicadas en los boletines Oxfam. El doctor Avid está decidido a consagrar sus conocimientos y su talento a la tarea de incrementar la producción mundial de alimentos, especialmente en esas zonas subdesarrolladas donde se han tomado las mencionadas fotografías. Su plan de trabajo se basa en la idea de que el retraso sufrido por la agricultura de estos países se debe, entre otras cosas, a la falta de fertilizantes; sabe también que, para las naciones industrializadas, no es fácil producir y exportar fertilizantes sencillos —nitratos, fosfatos— en cantidades suficientes para que resulten de utilidad. Es consciente, por otra parte, de que el empleo exclusivo de fertilizantes químicos tiene ciertos inconvenientes. Teniendo en cuenta todo ello, sus intenciones son servirse de técnicas de manipulación genética para

desarrollar cepas bacterianas fijadoras de nitrógeno muy mejoradas respecto a las existentes. Gracias a ellas el nitrógeno del aire podría ser transferido directamente al suelo sin necesidad de recurrir para ello a una industria química compleja ni de alterar el equilibrio edáfico natural.

El doctor Avid ha consumido gran número de años estudiando pacientemente por qué cepas muy prometedoras que hacían maravillas en el laboratorio fracasaban al ser transferidas a los campos de prueba tropicales, sin que ello desanimara al científico. Un día, escuchando casualmente los comentarios de un técnico agrícola sobre un tipo de maíz desarrollado en España de magníficos resultados en suelos pobres en fosfato, tuvo la corazonada de que el maíz, sin ayuda, difícilmente podría darse bien en un suelo de ese tipo: ¿Era posible que hubiera adquirido una bacteria de algún modo captadora de fosfato —como la que vive en las raíces del trébol y fija el nitrógeno del aire— en su beneficio? Avid, al que pronto correspondían unos días de vacaciones, decidió pasarlos en España, lo más cerca posible del centro agrícola donde se realizaba el trabajo sobre el maíz, y notificó su llegada a los colegas españoles para discutir juntos el problema. Así lo hizo y, de vuelta a su laboratorio tras el intercambio de opiniones y muestras, inició inmediatamente el cultivo de éstas, obteniendo del maíz español un microorganismo móvil con una capacidad para captar fosfato del suelo superior a todo lo que había visto hasta entonces. No fue difícil para un científico de su competencia conseguir la adaptación de esta nueva bacteria a fin de que pudiera vivir cómodamente en diferentes cultivos, en los arrozeros especialmente, la más importante fuente de alimento de las áreas tropicales. Las primeras pruebas de cereales tratados con *Phosphomonas avidii* realizadas en el centro experimental inglés tuvieron un éxito sorprendente, registrándose incrementos substanciales en el rendimiento de todos sin que se observara la aparición de efecto adverso alguno.

Llegó el momento de efectuar la prueba tropical en la estación experimental de campo de Queensland del Norte: un pequeño arrozal fue regado sin más ceremonia con la dilución de un cultivo de *P. avidii*. La bacteria, ignorando su anterior matrimonio con el cereal, se unió aquí, adúltera pero fervorosamente, con una recia y autosuficiente alga verdeazul que crecía sobre la superficie acuática del arrozal. En el cálido entorno tropical que ponía a su alcance todo cuanto requería un crecimiento explosivo, sus cantidades se duplicaban cada veinte minutos, sin que los pequeños organismos depredadores normalmente encargados de poner coto a un desarrollo de esta índole pudieran hacer nada por impedirlo. Era tal la avidez por el fósforo de la combinación alga-bacteria que el crecimiento de cualquier otra cosa era completamente imposible.

A las pocas horas, todo el arrozal y los circundantes aparecían cubiertos de una sustancia iridiscente, verdosa, que los asemejaba a pútridos estanques de patos. Algo había salido muy mal. Se dio la voz de alarma y los científicos pronto descubrieron la asociación entre la *P. avidii* y el alga: viendo lo que podía suceder si no actuaban con toda prontitud, tomaron las medidas necesarias para que el arrozal y las vías de agua afluentes fueran tratadas con un biocida a fin de acabar con la invasora pareja. Aquella noche, el doctor Avid y sus colegas se acostaron tarde,

cansados y preocupados. Cuando tras algunas horas de inquieto sueño saltaron de sus camas, la luz del amanecer confirmó sus peores pesadillas: la superficie de una pequeña vía de agua, separada de los arrozales por varios kilómetros y cercana al mar, estaba cubierta de una esponjosa masa verdegris. Despavoridos, aplicaron por doquier todos los agentes de destrucción a su alcance y, al comprobar que no podían atajar el avance de la plaga, el director de la estación intentó desesperadamente, pero en vano, persuadir al gobierno de que evacuara el área en el acto y la esterilizara con una bomba de hidrógeno antes de que fuera completamente imposible controlarla.

Dos días después, la infección había llegado a las aguas costeras y entonces fue demasiado tarde. En menos de una semana, la mancha verde era claramente visible para los pasajeros de los aviones que volaban a ocho mil metros por encima del Golfo de Carpentería. Seis meses más tarde, gran parte de los océanos y casi todas las tierras estaban cubiertas por una gruesa capa de légamo verdoso que se alimentaba vorazmente de la vida animal y vegetal que se pudría bajo ella.

Gaia había sido herida de muerte. De igual modo que, con demasiada frecuencia, los seres humanos perecen a causa del crecimiento incontrolado e invasor de una versión anómala de sus propias células, la cancerosa asociación alga-bacteria desplazaba más y más la intrincada variedad de especies características de un planeta vivo y saludable. La casi infinita gama de criaturas que llevan a cabo cooperativamente todas las tareas esenciales para la supervivencia común estaba siendo aplastada por un manto uniforme de verdor, cerrado a todo lo que no fuera su inextinguible ansia de alimentarse y crecer. Vista desde el espacio, la Tierra se había transformado en una esfera de un desvaído verde azulado. Agonizante Gaia, desaparecían los últimos restos del control cibernético a cuyo cargo está la composición de la superficie y de la atmósfera, manteniéndolas en el óptimo para la vida. La producción biológica de amoníaco se había interrumpido hacía tiempo y las grandes masas de materia orgánica en putrefacción —incluyendo enormes cantidades del alga misma— producían compuestos sulfurosos que en la atmósfera se oxidaban transformándose en ácido sulfúrico. Las lluvias eran, por consiguiente, progresivamente más ácidas; las caídas sobre las masas de tierra expulsaban de este habitat al intruso. La falta de otros elementos esenciales empezó a dejarse sentir y a repercutir más y más en el crecimiento de la talofita, que fue extinguiéndose gradualmente, sobreviviendo tan sólo en escasos hábitats marginales de donde también desaparecería así se hubieron acabado los nutrientes disponibles.

Examinemos en detalle los pasos que conducirían a la Tierra a transformarse en un planeta yermo de régimen permanente, teniendo en cuenta que la escala temporal sería del orden del millón de años o más. Las tormentas y las radiaciones procedentes del Sol y del espacio exterior continuarían bombardeando nuestro indefenso mundo, rompiendo los enlaces químicos más estables: los elementos alterados se recompondrían en formas más próximas al equilibrio. En principio, la más importante de estas reacciones tendría lugar entre el oxígeno y la materia orgánica muerta. La mitad, aproximadamente, se oxidaría, quedando el resto

enterrada en arenas o lodos. Este proceso se cobraría solamente un pequeño porcentaje del oxígeno: la parte más cuantiosa iría combinándose, poco a poco pero inexorablemente, con el nitrógeno del aire y los gases reductores expulsados por los volcanes.

Hemos hablado ya de las lluvias ácidas, las precipitaciones cargadas de sulfúrico y de nítrico. Pues bien, uno de sus efectos sería devolver a la atmósfera, en forma de gas, el dióxido de carbono del suelo fijado por los agentes biológicos en cosas tales como calizas o cretas. El dióxido de carbono, decíamos en anteriores capítulos, es un gas "invernadero". En pequeñas cantidades, su efecto sobre la temperatura del aire es proporcional a la cantidad añadida o, como diría un matemático, tiene efecto lineal. Pero cuando la concentración de CO₂ atmosférico llega —o excede— al 1 %, entran en juego efectos no lineales que provocan una intensa subida de la temperatura. Al faltar la biosfera que lo fija, la tasa atmosférica de dióxido de carbono sobrepasaría probablemente esa cifra crítica del 1 %, con lo que la Tierra alcanzaría rápidamente una temperatura próxima a la del agua en ebullición. Esto, a su vez, aceleraría las reacciones químicas acercándolas todavía más al punto de equilibrio. Entretanto, los bullentes océanos se habrían encargado de hacer desaparecer los últimos vestigios de la pareja destructora.

En nuestro presente mundo, ascendiendo unos 13.000 metros por encima de la superficie, nos encontrarnos con un frío tan intenso que el vapor del agua se hiela casi en su totalidad: su concentración a esa altura es únicamente de una parte por millón. El escape de este pequeño resto hacia capas superiores donde puede disociarse produciendo oxígeno, es tan lento como para no tener repercusión alguna. La violenta climatología, empero, de un mundo de océanos hirvientes, generaría probablemente nubes cargadas de agua que alcanzarían las capas atmosféricas altas, provocando en ellas un incremento de la temperatura y de la humedad; ello tendría como consecuencia una más rápida descomposición del agua, con mayor liberación de hidrógeno (que escaparía al espacio) y de oxígeno. La mayor presencia de éste aseguraría, en última instancia, la desaparición de virtualmente todo el nitrógeno de la atmósfera, finalmente compuesta de CO₂ y vapor, algo de oxígeno (probablemente menos del 1%) y argón, gas raro sin función química (es decir, inerte). La Tierra quedaría, pues, permanentemente envuelta en un capullo blanco brillante de nubes, convirtiéndose en un segundo Venus, aunque no tan cálido.

La progresión hacia el equilibrio podría seguir, sin embargo, un camino muy diferente. Si, durante el período de crecimiento frenético, el alga hubiera consumido una gran parte del CO₂ atmosférico, la Tierra habría iniciado un proceso de enfriamiento irreversible. De igual modo que un exceso de dióxido de carbono en la atmósfera provoca sobrecalentamiento, su desaparición tiene como consecuencia el desplome de las temperaturas. La mayor parte del planeta se cubriría de nieves y hielos, muriendo de frío los últimos restos de esa asociación excesivamente ambiciosa. La combinación química de nitrógeno y oxígeno también tendría lugar, aunque mucho más lentamente. El resultado final sería un planeta más o menos helado y provisto de una rarificada atmósfera compuesta por

CO₂ y argón, con trazas únicamente de oxígeno y nitrógeno. Algo, con otras palabras, semejante a Marte, aunque no tan frío.

No podemos saber con certeza cómo irían las cosas. Sí es seguro que una vez destruida la red de la inteligencia y el intrincado sistema cibernético de Gaia no habría forma de reconstruirlo. Nuestra Tierra habría dejado de ser el planeta que rompe todas las reglas, el policromo inadaptado repleto de vida para, muerta ya y emplazada entre Marte y Venus, sus hermanos estériles, ajustarse por siempre a la yerma normalidad.

Quiero recordarte, lector, que lo precedente es ficción. Como modelo puede resultar científicamente plausible, si aceptamos la existencia de la asociación bacteria-alga, su estabilidad y la imposibilidad de detener la agresión a tiempo. La manipulación genética de microorganismos en beneficio de la humanidad ha sido una actividad a la que muchos han dedicado su tiempo y su talento desde la época en que se logró domesticarlos para realizar tareas del tipo de la fermentación del vino o del queso. Cualquiera que se consagre a este campo —todo granjero en realidad— confirmará que la domesticación no favorece la supervivencia en condiciones no domésticas. Tan vehemente se ha mostrado, sin embargo, la preocupación pública por los peligros de la manipulación del material genético —ADN—, que es bueno contar con la confirmación de una autoridad como John Postgate respecto a que este pequeño ensayo en clave de SF es tan sólo un vuelo de la fantasía. El código genético de la vida real, ese lenguaje universal que todas las células vivas comparten, lleva inscritos demasiados tabús para que algo así pueda suceder, sin contar con el complejo sistema de seguridad encargado de que ninguna exótica especie proscrita crezca por su cuenta hasta convertirse en un floreciente sindicato del crimen. A lo largo de la historia de la vida y a través de innúmeras generaciones de microorganismos, han debido ser descartadas grandes cantidades de combinaciones genéticas viables.

La continuidad de nuestra ordenada existencia durante un período tan dilatado puede quizás atribuirse a otro proceso regulador de Gaia, desarrollado para mantener la seguridad genética interna.

4. Cibernética

Fue Norbert Wiener, el matemático norteamericano, quien puso en circulación el término "cibernética" (derivado del griego *kybernetes*, timonel) para describir la ciencia que estudia los sistemas de comunicación y control autorreguladores en los seres vivos y en las máquinas. El vocablo parece apropiado, porque la función primaria de muchos sistemas cibernéticos es mantener el rumbo óptimo a través de condiciones cambiantes para arribar a un puerto predeterminado.

La experiencia nos indica que los objetos estables son los de base ancha y centro de gravedad bajo, y sin embargo raramente sentimos asombro ante nuestra propia postura erecta, sostenidos tan sólo por unas piernas articuladas y unos pies estrechos. El mantenernos derechos hasta cuando nos empujan o la superficie en la que nos sustentamos se mueve, como sucede en un autobús o en un barco; la capacidad de andar o correr sobre terreno irregular sin caer; el que nuestra temperatura corporal se mantenga dentro de unos estrechos límites con independencia de la exterior, son ejemplos todos ellos de procesos cibernéticos, procesos exclusivos de los seres vivos o de las máquinas altamente automatizadas.

Si, con un poco de práctica, somos capaces de mantenernos de pie en la cubierta de un barco, es gracias al conjunto de sensores nerviosos que, enterrados en el espesor de nuestros músculos, piel o articulaciones, suministran al cerebro un constante flujo de información concerniente a los movimientos y localización espacial de las diferentes partes de nuestros cuerpos, así como de las fuerzas exteriores que en cada momento actúan sobre ellos. Poseemos además una pareja de órganos asociados al oído interno, cada uno de los cuales está provisto de una burbuja que, como la de un nivel, se mueve en el seno de un fluido registrando cualquier cambio en la posición de la cabeza. No olvidemos nuestros ojos, que nos informan de nuestra postura con relación al horizonte. El cerebro procesa todo este caudal de datos, normalmente a nivel inconsciente, y los compara con la postura que conscientemente pretendemos. Si hemos decidido permanecer erguidos a pesar del movimiento del barco, quizá para contemplar a través de unos prismáticos el puerto que se aleja, esta postura es el punto de referencia utilizado por el cerebro para determinar de qué forma y en qué grado el balanceo del navío afecta a nuestra posición. Los órganos sensoriales envían al cerebro un continuo torrente de información y éste, a través de los nervios motores, manda señales a los grupos musculares adecuados que, mediante contracción o relajación, corregirán nuestras desviaciones de la vertical.

Si nos mantenemos erguidos es, pues, mediante un proceso que compara la intención con la realidad, un proceso que detecta las divergencias entre una y otra y las corrige mediante la aplicación de las fuerzas oportunas. Caminar o balancearse sobre una pierna es más difícil de realizar y más largo de aprender y, aunque los problemas de montar en bicicleta son todavía mayores, el mismo proceso de control activo que nos permite la bipedestación pronto hace de ello una segunda naturaleza.

Merece la pena que nos detengamos un poco más en los sutiles mecanismos gracias a los cuales podemos realizar algo tan sencillo como es permanecer de pie. Si, volviendo al barco, cuando la cubierta se inclina aplicamos una fuerza correctora demasiado grande, nos inclinaremos excesivamente en sentido opuesto y, si queremos compensar esta nueva desviación de la posición de referencia con demasiada brusquedad, nos veremos precipitados en el sentido de la oscilación original, lo que dará con nuestros huesos en la cubierta y nos hará abandonar el deseo de seguir de pie. Estos "bandazos" aparecen con gran frecuencia en los sistemas cibernéticos: el "temblor intencional", signo importantísimo de ciertos estados patológicos humanos*, es una exacerbación de esta característica que conlleva grandes trastornos de la motilidad voluntaria. Si uno de estos infortunados pacientes intenta, por ejemplo, coger un lápiz, exagera a su pesar la intensidad del movimiento, lo que va seguido de una corrección también forzada que frustra en última instancia el propósito mencionado. No se trata por tanto, simplemente, de oponernos a una fuerza que intenta apartarnos de nuestra meta, sino que hemos de hacerlo con suavidad, precisión y firmeza.

Y todo esto, ¿qué relación tiene con Gaia? Posiblemente muy importante. Una de las propiedades más típicas de los seres vivos, del más pequeño al mayor, es su capacidad para desarrollar, utilizar y conservar sistemas que tienen a su cargo una determinada función y la realizan mediante un proceso cibernético de tanteo. El descubrimiento de un sistema de este género, que operase a escala planetaria y cuya función fuera la instauración y el mantenimiento de las condiciones físicas y químicas óptimas para la vida, sería una convincente prueba de la existencia de Gaia.

Los sistemas cibernéticos se sirven de una lógica circular que quizá resulte extravagante en ocasiones a quienes están habituados a pensar en términos de la lógica lineal tradicional, de la lógica de causa y efecto. Empecemos, pues, por examinar algunos sistemas ingenieriles sencillos que utilizan la cibernética para mantener un estado elegido; una temperatura determinada, por ejemplo. La mayoría de los hogares poseen actualmente cocinas y planchas eléctricas, sistemas de calefacción y otros ingenios para los que es fundamental mantener un nivel térmico prefijado. El calor de la plancha ha de ser el suficiente para alisar sin quemar; el horno ha de calentar lo necesario, sin socarrar los guisos o dejarlos crudos, y la calefacción debe mantener una temperatura agradable en la casa, evitando tanto el excesivo frío como el demasiado calor. Examinemos el horno más de cerca. Consiste en un espacio más o menos paralelepípedo, diseñado para conservar el calor, un cuadro de mandos y los elementos caloríferos encargados de transformar energía eléctrica en calor. En su interior hay un termostato, que es una clase especial de termómetro donde, a diferencia de los ordinarios, no se lee la temperatura en una escala visual, sino que, al alcanzar ésta un determinado nivel — fijado previamente desde un dial del cuadro de mandos conectado directamente con el termostato— provoca el salto de un interruptor. Una

* De las cerebelopatías y de la esclerosis diseminada, entre otros (N. del T.).

característica esencial y quizá sorprendente de un horno bien construido en su capacidad de alcanzar temperaturas muy superiores a las necesarias para cocinar porque, de no ser así, el tiempo necesario para situarse en el nivel térmico preciso sería excesivamente largo. Si, por ejemplo, el dial se lleva a los 300° y se conecta el horno, los calefactores se ponen casi inmediatamente al rojo vivo y la temperatura del interior sube a toda velocidad hasta que llega a los 300° predeterminados: el termostato reconoce la cifra y corta el suministro de energía. La temperatura, sin embargo, sube un poco más debido al calor que escapa de los elementos aún al rojo. Al enfriarse éstos, la temperatura desciende; cuando el termostato detecta que ha caído por debajo de los 300°, el interruptor salta nuevamente y la energía vuelve a fluir. Hay un breve período de ulterior enfriamiento mientras las resistencias se calientan de nuevo y el ciclo recomienza. Vemos, por consiguiente, que la temperatura del horno oscila algunos grados por encima y por debajo de la temperatura deseada; este pequeño margen de error es un rasgo típico de los sistemas cibernéticos. Como los seres vivos, buscan la perfección y se acercan a ella, pero nunca la alcanzan del todo.

¿Y qué tiene todo esto de especial? La abuela realizaba platos suculentos sin necesidad de utilizar estos artilugios equipados con termostatos, ¿no? En la época de nuestras abuelas, los hornos eran calentados mediante carbón o leña y con toda seguridad que si la abuela no se hubiera encargado de realizar las funciones del termostato, las tartas, en lugar de resultar esplendorosas obras de arte, habrían quedado siempre o bien quemadas, o bien amazacotadas y tristonas. La abuela sabía reconocer e interpretar los signos que indicaban una temperatura adecuada a cada plato, sabía cuándo debía avivarse el fuego o cuándo era preciso amortiguarlo. El oído, el gusto, el olfato y el tacto le indicaban cuándo todo iba saliendo según lo previsto o si era necesario introducir algún cambio. Si los ingenieros quisieran realizar hoy un horno tan eficiente como ella tendrían que diseñar un robot abuelita a cuyo cargo quedara la vigilancia de los aspectos mencionados.

Para cualquiera que intente utilizar un horno sin la imprescindible supervisión mecánica o humana se hacen pronto patentes unos resultados que distan mucho de ser satisfactorios. Mantener la temperatura necesaria durante, digamos, una hora, exige compensar exactamente toda pérdida de calor: una corriente de aire frío procedente del exterior, un cambio en el voltaje eléctrico o en la presión del gas, el tamaño del plato en preparación, el que estén o no encendidas otras partes de la cocina son factores que pueden impedirnos obtener una determinada temperatura de cocción durante un tiempo prefijado.

La realización correcta de cualquier actividad, ya sea cocinar, pintar, escribir, andar o jugar al tenis es siempre un asunto de cibernética. En todas estas actividades intentamos acercarnos lo más posible a la perfección, cometer el mínimo número de errores: comparamos nuestros resultados con este ideal y aprendemos por experiencia, esforzándonos continuamente por mejorar hasta sentir la certidumbre de estar tan cerca del óptimo como nuestras aptitudes permiten. A este proceso se le denomina, apropiadamente, aprendizaje por tanteo.

Es interesante señalar que, en la década de los treinta, ya se utilizaban técnicas cibernéticas, aunque los hombres y mujeres que las empleaban no fueran conscientes de ello. Los ingenieros y los científicos las incorporaban al diseño de instrumentos y mecanismos complejos, aunque en casi ningún caso existía entendimiento formal o definición lógica del principio implicado. Se trataba de una situación muy parecida a la de monsieur Jourdain, el aspirante a caballero de Moliere, que hablaba en prosa sin él saberlo. El larguísimo retraso del entendimiento de la cibernética es probablemente otra infeliz consecuencia de nuestro legado de procesos de pensamiento clásicos. En cibernética, la causa y el efecto dejan de ser patrón universal; es imposible establecer cuál se produce antes que el otro, y hasta la cuestión misma deja de tener importancia. Los filósofos griegos abominaban de los argumentos circulares tan firmemente como creían que la naturaleza abominaba del vacío. Su rechazo de los razonamientos circulares, la clave para entender la cibernética era tan erróneo como su suposición de que el Universo estaba lleno de aire respirable.

Volvamos a nuestro horno provisto de termostato. ¿Es el suministro de energía el que lo mantiene a la temperatura adecuada? ¿Se trata, más bien, del termostato, o es el interruptor controlado por éste? ¿Es, quizá, el "programa" fijado por nosotros cuando elegimos un determinado punto en la escala del dial exterior? Es evidente: cuando queremos entender el modo de funcionamiento de un sistema cibernético —hasta de un sistema tan primitivo como es el horno— el método analítico, el método de dividir en partes y estudiar cada una por separado, la esencia del pensamiento lógico en términos de causa y efecto, no nos lleva a ninguna parte. La clave para el entendimiento de los sistemas cibernéticos es tener muy presente que, como en el caso de la vida, son siempre superiores a la simple suma de sus partes constitutivas. Sólo son inteligibles en cuanto sistemas en funcionamiento. De las posibilidades funcionales de un horno desconectado o desarmado obtenemos una información equivalente a la que nos proporciona el cadáver de alguien sobre la persona que ese alguien fue una vez.

La Tierra gira frente a una fuente de calor no controlada, el Sol, cuyo rendimiento está muy lejos de ser constante. Sin embargo, la temperatura media de la superficie terrestre ha variado bien poco desde el comienzo de la vida —hace aproximadamente unos tres eones y medio— hasta ahora. Nunca ha tenido tan escasa o tan elevada como para impedir la continuidad de los fenómenos vitales, a pesar de los drásticos cambios experimentados por la composición de la atmósfera inicial y los altibajos en el rendimiento energético del Sol.

En el capítulo 2 pasábamos revista a la posibilidad de que la temperatura de la superficie terrestre fuera mantenida dentro de un margen óptimo por una entidad compleja denominada Gaia, que habría realizado esta función durante gran parte de la existencia del planeta: es ahora el momento de preguntarnos qué partes de sí misma emplea como termostatos. Parece en principio poco probable que un solo mecanismo de control de la temperatura planetaria sea lo bastante preciso como para poder encargarse de toda la función reguladora. Lo que es más: tres

eones y medio han sido sin duda período suficiente para desarrollar un sistema global de control altamente sofisticado. El examen del sistema regulador de la temperatura corporal nos preparará convenientemente para la clase de sutilezas que hemos de esperar, y debemos buscar, cuando desentrañemos los mecanismos de regulación de temperatura utilizados por Gaia.

El termómetro clínico es todavía un útil auxiliar del diagnóstico médico: la información que proporciona puede ser decisiva a la hora de descartar o confirmar una invasión microbiana. La gráfica de la temperatura de un paciente suministra una reveladora aportación sobre la naturaleza de los invasores; determinados padecimientos poseen una pauta de temperaturas tan característica que su examen basta para formular el diagnóstico diferencial. Este es el caso, por ejemplo, de la fiebre ondulante, enfermedad cuyo nombre resulte sumamente expresivo. Aún hoy, sin embargo, los procesos mediante los cuales el cuerpo controla su temperatura son tan misteriosos para casi todos los médicos como para sus pacientes. Tan sólo en los últimos años algunos fisiólogos, haciendo gala de gran valor y energía mental, han abandonado su práctica médica profesional para reeducarse como ingenieros de sistemas. De este nuevo enfoque deriva el parcial entendimiento que actualmente se tiene de los procesos, maravillosamente coordinados, que regulan la temperatura corporal.

Con buena salud, nuestra temperatura varía según las necesidades del momento, no permanece fija en ese mítico nivel normal de 37° C (98,4 F). Si realizamos una actividad física intensa y continuada subirá algunos grados, alcanzando valores de fiebre. En las horas nocturnas o si ayunamos, puede descender considerablemente por debajo del valor "normal" indicado. Más aún: estos 37° C se aplican únicamente al conjunto cabeza-tronco, en cuyo interior se hallan casi todos los sistemas importantes de la economía. Nuestros pies, manos y piel han de soportar una amplia gama de temperaturas; hasta cuando se hallan próximos a la congelación, están diseñados para funcionar con poco más que algún estremecimiento de protesta.

T. H. Benzinger y sus colegas ampliaron la perspectiva con su descubrimiento de que la temperatura corporal es mantenida en un margen óptimo continuo mediante una decisión consensual tomada por el cerebro en consulta con las demás partes del cuerpo. La referencia no es tanto una escala de temperaturas cuanto el nivel de eficiencia de los diferentes órganos corporales en relación con las temperaturas. Se pretende y se pacta el funcionamiento óptimo para esa ocasión, no la temperatura óptima *per se*.

Se sospechaba desde hacía tiempo que el temblor indicaba algo más que el mero sufrimiento causado por la exposición al frío. Es realmente un medio de generar calor, ya que incrementa la tasa de actividad muscular y con ella la combustión de combustible celular. La sudoración, por contra, es útil para reducir la temperatura, dado que la evaporación de agua — incluso en muy pequeñas cantidades— disipa una gran cantidad de calor. El descubrimiento decisivo, escondido bajo una avalancha de observaciones científicas rutinarias acerca de la sudoración, el temblor y

de los procesos relacionados con ellos resultó ser que la valoración cuantitativa de estas actividades ofrecía una explicación completa y convincente de la regulación de la temperatura corporal. Nuestra capacidad de sudar o de temblar, de quemar alimentos o reservas grasas, de controlar la cantidad de sangre que afluye a nuestra dermis y a nuestras extremidades son todas ellas parte de un sistema cooperativo de regulación de nuestra temperatura torácico-cefálica frente a una gama de temperaturas ambientales cuyos límites inferior y superior son 0° y 40,5° C, respectivamente.

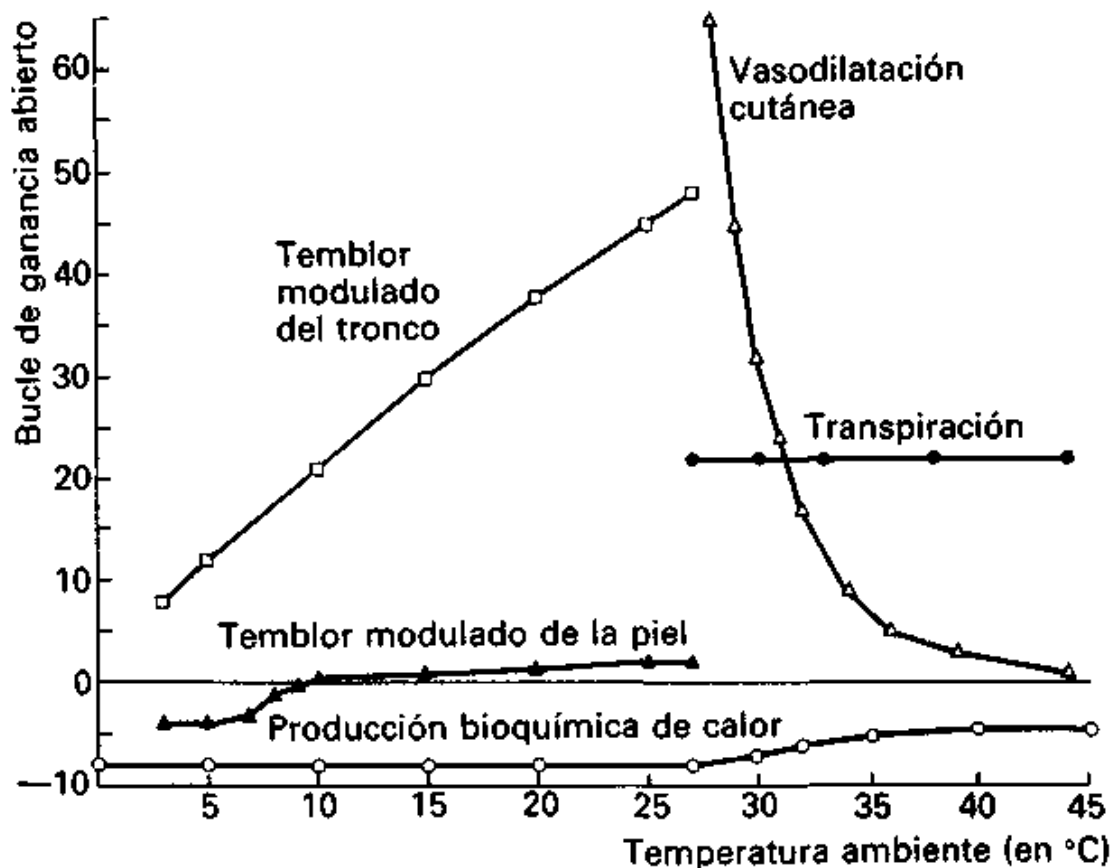


Fig. 3. Diagrama ingenieril que ilustra la potencia de funcionamiento de los cinco procesos reguladores de la temperatura corporal humana cuando un hombre desnudo es expuesto a diferentes temperaturas ambientales.

Cada animal se sirve de cada uno de estos procesos reguladores en medida diferente. Para el perro, por ejemplo, es la lengua el área principal de enfriamiento por evaporación, como cualquiera que haya visitado un canódromo puede confirmar. El hombre y otros animales se trasladarán de entornos más cálidos a otros de menor temperatura, o al revés, según convenga, en su incesante búsqueda del máximo bienestar. Si es necesario, se modifica el entorno local para reducir la exposición a límites soportables. Nosotros construimos casas y nos cubrimos con ropas; otros animales están cubiertos de pelo y buscan o confeccionan madrigueras. Estas actividades constituyen un mecanismo adicional de control térmico, lo que es imprescindible cuando las condiciones externas sobrepasan los límites de los sistemas reguladores internos.

Consideremos por un momento la parte filosófica del asunto, centrándonos en el problema del dolor y la incomodidad.

Algunos de nosotros estamos condicionados de tal modo a recibir el frío, el calor o el sufrimiento de toda índole como una señal o castigo del cielo por eventuales pecados de acción u omisión, que tendemos a olvidar que todas estas sensaciones son componentes esenciales de nuestro instinto de supervivencia. Si el frío y los temblores no fuesen desagradables no los estaríamos discutiendo, porque nuestros antepasados remotos habrían muerto de hipotermia; y si recordar esto parece demasiado obvio, merece la pena no olvidar que C.S. Lewis lo encontró lo suficientemente importante para nacerlo el tema de una de sus obras, *The problem of Pain*. Para mucha gente el dolor es un castigo en lugar de un fenómeno fisiológico normal.

Dijo Walter B. Cannon, célebre fisiólogo norteamericano: "Los procesos fisiológicos coordinados que mantienen gran parte de los estados de régimen permanente en el organismo y en los que toman parte el sistema nervioso, el cardiopulmonar, el hepatoesplénico y otros (todos los cuales trabajan juntos, cooperativamente) son de tal complejidad y tan característicos de los seres vivos que he sugerido una especial designación para ellos: homeostasis." Haremos bien en tener presentes estas palabras cuando pretendamos dilucidar si existe o no un proceso de regulación de la temperatura planetaria, mientras intentamos poner de manifiesto ese grupo, que no medio único, de mecanismos diseñados para controlar la temperatura global.

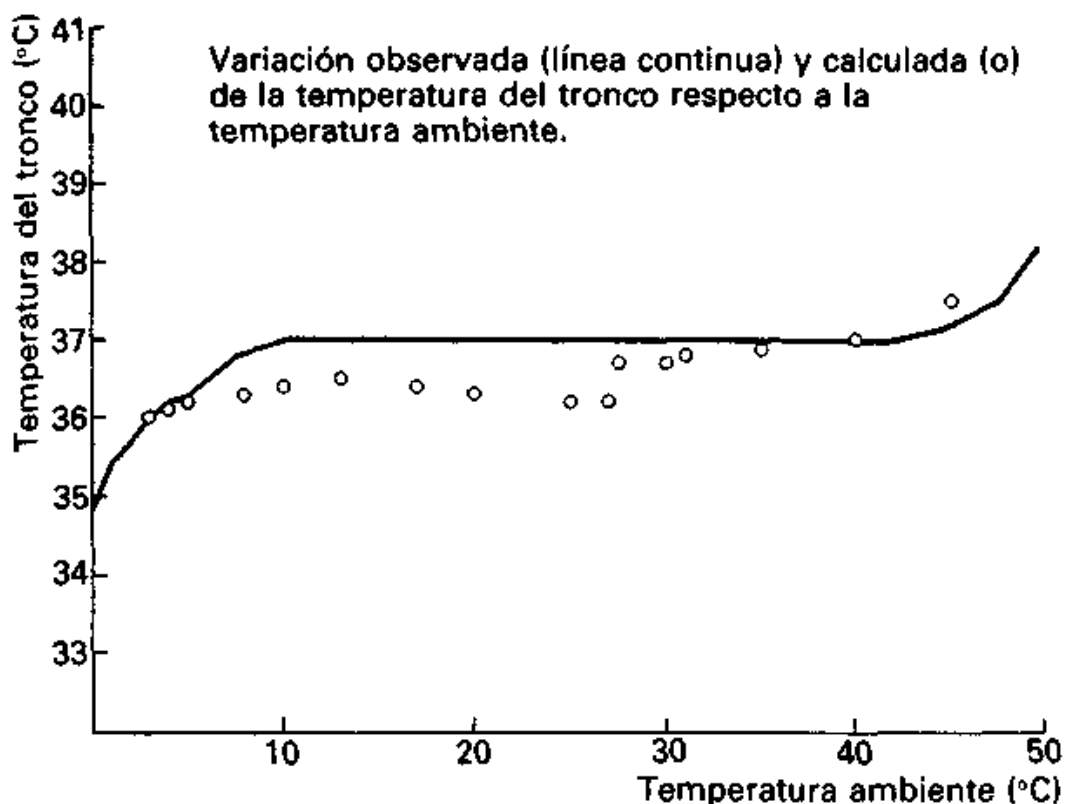


Fig. 4. Comparación entre la temperatura del tronco de una persona viva (línea continua) y la temperatura calculada a partir de la información suministrada por la figura 3 (puntos). Comprobamos que es factible predecir con exactitud las variaciones de la temperatura corporal estableciendo un consenso entre las respuestas de los cinco sistemas separados.

Los sistemas biológicos son intrínsecamente complejos, pero hoy pueden ser entendidos en términos de ingeniería cibernética, cuya teoría ha ido

mucho más lejos de los primitivos mecanismos que regulan la temperatura de los electrodomésticos. Impulsados por nuestra acuciante necesidad de ahorrar energía quizá lleguemos algún día a poner a punto sistemas mecánicos tan sutiles y flexibles como sus contrapartidas biológicas. El sistema calefactor doméstico, por ejemplo, limitará su funcionamiento a las habitaciones donde haya gente, apagando y encendiendo partes de sí mismo sin intervención humana.

Volviendo a Gaia: ¿Cómo reconocemos un sistema automático de control? ¿Buscamos el suministro de energía, el panel regulador o quizá los complicados amasijos de piezas? Como ya hemos dicho, para entender el funcionamiento de un sistema cibernético el análisis de sus partes por separado no suele ser de gran ayuda: a menos que sepamos qué buscar, los métodos analíticos están condenados al fracaso, ya sea en sistemas cibernéticos domésticos o planetarios.

Incluso aunque demos con pruebas de un sistema planetario de regulación de temperatura no será fácil desentrañar sus secretos si están tan profundamente interconectados como en el caso de la temperatura corporal. La regulación de la composición química no es menos importante: el control de la salinidad, por ejemplo, puede ser una de las funciones reguladoras claves de Gaia, y sus detalles son tan intrincados como los del funcionamiento de ese asombroso órgano, el riñón, podría costarnos mucho establecerlos. Sabemos actualmente que el riñón, de igual modo que el encéfalo, es un órgano especializado en procesar información. Tiene a su cargo la regulación de la salinidad de la sangre, entre otras tareas; para cumplir este cometido, reconoce y acepta o rechaza incontables iones por segundo. Obtener este conocimiento no ha sido fácil y todavía puede tener más dificultades desenredar el enrevesado sistema que cuida de la regulación global de la salinidad y la quimiostasis.

Hasta un sistema de control sencillo como el del horno puede realizar su función de diferentes maneras. Un extraterrestre totalmente ajeno a los últimos doscientos años de nuestro desarrollo tecnológico no tendría problemas para aprender el principio y el funcionamiento de un horno de gas, pero ¿cómo se las arreglaría ante uno de microondas?

Los especialistas en cibernética utilizan un enfoque general para reconocer los sistemas de control. Se le conoce como el método de la caja negra, y procede de la enseñanza de la ingeniería eléctrica, donde se pide a los estudiantes que describan la función de una caja negra —sin abrirla— de la que salen unos cuantos cables. Para ello conectan los cables a fuentes de energía, instrumentos de medida, circuitos especiales, etc.; las conclusiones que obtengan han de servirles para averiguar las características de la caja.

En cibernética se asume que la caja negra o su equivalente están funcionando con toda normalidad. Si se trata de un horno, está conectado y cocinando algo. Si es una criatura viva, vive y está consciente. El paso siguiente consiste en modificar alguna propiedad ambiental que puede estar controlada por el sistema en cuestión. Si, por ejemplo, estamos estudiando sistemas humanos, podemos hacer variar la inclinación del suelo sobre el que se yergue el sujeto con diferentes velocidades a fin de descubrir su capacidad para permanecer de pie cuando su base de

sustentación está sometida a cambios bruscos; de experimento tan sencillo podemos obtener gran cantidad de datos sobre la capacidad que el sujeto tiene de mantener el equilibrio. En cuanto al horno, podríamos modificar la temperatura ambiente conectándolo primero en una cámara frigorífica y luego en una cámara caliente, ambientes donde tendríamos oportunidad de determinar el punto en el que las condiciones externas empiezan a repercutir en la temperatura interior, viendo también hasta donde afectaban al suministro de energía estas modificaciones ambientales.

Este método de estudio de los sistemas cibernéticos —registrando las perturbaciones que un determinado cambio ambiental introduce en aquellos parámetros controlados por el sistema —es, obviamente, de carácter general. Puede y debe ser también un método *blando*: si se aplica correctamente no tiene por qué dañar al sistema investigado. El desarrollo de esta técnica es equiparable a la evolución experimentada por los sistemas de estudio de las criaturas vivas. Hasta hace bien poco las matábamos y las disecábamos *in situ*; posteriormente, se llegó a la conclusión que era más conveniente capturarlas con vida y estudiarlas en los zoos. Hoy preferimos observarlas en sus habitats naturales. Los métodos de esta índole, los más civilizados, no son aún generales, desgraciadamente. Quizá se utilicen en estudios de campo, pero la agricultura sigue perjudicando a los animales con demasiada frecuencia, porque aunque no los daña directamente, destruye sus habitats para satisfacer nuestras necesidades reales o imaginarias. Muchos a quienes repugnan los sangrientos resultados de la escopeta del cazador o de los dientes del sabueso, gentes sensibles y compasivas, se muestran indiferentes, o casi, ante el deshaucio y la muerte que la excavadora, el lanzallamas y el arado acarrearán a nuestros congéneres de Gaia al destruir sus habitats. Tan normal es entre nosotros aceptar el genocidio mientras condenamos el asesinato, combatir contra los mosquitos y tragarnos los camellos, que bien podríamos preguntarnos si esta conducta híbrida constituye una característica paradójica que, como el altruismo, favorece la supervivencia de la especie.

Nuestras consideraciones sobre cibernética y teoría del control han sido, hasta aquí, muy generales. Queda fuera de alcance de este libro expresar los conceptos cibernéticos en el verdadero idioma de la ciencia, el lenguaje de las matemáticas; de su empleo se deriva inmediatamente un entendimiento completo. Podemos y debemos, sin embargo, adentrarnos un poco más en esta rama de la ciencia que tan eficazmente describe la compleja actividad de los seres vivos.

Bien podría decirse que los ingenieros ejercen cibernética aplicada. Expresan sus ideas mediante notación matemática sirviéndose además de unas pocas palabras y expresiones claves que etiquetan los conceptos más importantes de la teoría de control. Son estos términos descriptivos realistas y sucintos; habida cuenta de que no existe aún mejor forma de poner en palabras lo que significan, intentaremos definirlos. Reexaminemos, pues, nuestro horno eléctrico desde el punto de vista de un ingeniero, dado que la descripción de su funcionamiento ofrece el contexto adecuado para explicar el significado de términos cibernéticos

tales como "realimentación negativa". Nuestro horno es una caja hecha de acero y cristal, envuelta en fibra de vidrio u otro material aislante similar para impedir que el calor escape demasiado rápidamente, al tiempo que asegura una temperatura moderada en sus paredes externas. Las internas están recubiertas de calefactores eléctricos; el interior también alberga el correspondiente termostato. En el horno que describíamos antes, el termostato era muy tosco, no iba más allá de un interruptor diseñado para desconectar el aporte de corriente eléctrica cuando se alcanzaba la temperatura deseada. El que examinamos ahora es un modelo mejor, con un diseño que lo hace más apropiado para su utilización en un laboratorio que en una cocina. En lugar de un interruptor de apagado-encendido para controlar el nivel térmico, tiene un sensor de temperatura, mecanismo que genera una señal proporcional al calor alcanzado. La señal no es otra cosa que una corriente eléctrica lo bastante potente para activar un relé térmico, pero ni por asomo lo suficiente para tener algún efecto sobre la temperatura del horno. Es un circuito que no transmite energía, sino información.

La débil señal emitida por este sensor es conducida hasta un amplificador que, de modo muy similar al de su homónimo de un receptor de radio o televisión, la magnifica hasta dotarla de potencia bastante para calentar el horno. Este amplificador no genera electricidad, sino que se limita a servirse del suministro de ésta utilizando una pequeña fracción para enjugar sus propias exigencias de funcionamiento. Como la señal emitida por el sensor aumenta en proporción directa a la temperatura del horno no puede ser conectado directamente al amplificador; de hacerlo así, no habríamos obtenido un horno con control de temperatura, sino un horno candidato al más completo desastre cibernético, un ejemplo práctico de lo que los ingenieros denominan "realimentación positiva". Al subir la temperatura del horno, los elementos calefactores generarían cada vez más calor, estableciéndose un círculo vicioso, que terminaría por convertir el interior en un infierno en miniatura si no se ha intercalado en el sistema algún tipo de fusible que cortara el suministro de electricidad.

La forma correcta de conectar el sensor de temperatura al amplificador o, como diría un ingeniero, de "cerrar el bucle", ha de realizarse de modo que, cuanto mayor sea la señal emitida por el sensor, menor sea la potencia generada por el amplificador. Esta forma de conexión se conoce como "realimentación negativa". En el horno que estamos considerando, la realimentación negativa y la positiva vienen dadas, sencillamente, por el orden de los dos cables que salen del sensor de temperatura.

La rápida progresión hacia el desastre de la realimentación positiva o el preciso ajuste de la temperatura de la negativa dependen de una propiedad del amplificador denominada "ganancia": el número de veces que ha de multiplicar la débil señal procedente del sensor para aumentar o disminuir el flujo de energía llegado a los calefactores. Donde coexisten varios bucles, cada uno posee su propio amplificador, a cuya capacidad se denomina "ganancia del bucle". En muchos sistemas complejos, como nuestros cuerpos, coexisten bucles de realimentación positiva y negativa. Es obvio lo conveniente de la realimentación positiva en ocasiones, cuando, por ejemplo, se trata de restablecer una temperatura normal tras un enfriamiento

repentino. Cuando se ha logrado el propósito apetecido, la realimentación negativa vuelve a tomar las riendas. El horno de la abuela, que perdía temperatura cada vez que ésta abandonaba la cocina, se denomina de "bucle abierto". No mentiríamos si afirmáramos que la parte más importante de nuestra búsqueda de Gaia está ligada a la elucidación de si una característica de la Tierra, tal como su temperatura de superficie, viene determinada por el azar o si bien la mano de Gaia se deja sentir a través de un control ejercido mediante realimentación positiva o negativa.

Es importante darse cuenta que lo que un sensor reenvía es información. Tal información puede ser transmitida mediante una corriente eléctrica, como en el caso de nuestro horno, donde el mensaje se transmite gracias a los cambios de la intensidad de la señal. Cualquier otro vehículo de información puede funcionar igualmente bien, la palabra hablada, sin ir más lejos. Si alguien que viaja en coche tiene la sensación de que el conductor circula excesivamente deprisa y exclama "frena, vas demasiado rápido", utiliza realimentación negativa (suponiendo que quien conduce preste oídos al requerimiento del pasajero; si las relaciones entre ambos no son todo lo cordiales que debieran, a mayor insistencia del pasajero más acelerará el conductor, produciéndose, consiguientemente, un caso más de realimentación positiva).

La información es parte intrínseca y esencial de otros sistemas de control, los de la memoria, encargados de almacenar, buscar y comparar información constantemente, para que los errores puedan corregirse y se alcancen los propósitos elegidos. Diremos, finalmente, que se trate de un sencillo horno eléctrico, una cadena de comercios controlados por un ordenador, un gato dormido, un ecosistema o la mismísima Gaia, si comprobamos su naturaleza de entidades adaptativas, capaces de cosechar información y de almacenar experiencia y conocimiento, estamos estudiando realidades que competen a la cibernética, que pueden ser denominadas "sistemas" con toda propiedad.

El suave funcionamiento de un sistema de control en perfecto orden tiene un atractivo muy especial. La magia del ballet debe mucho al grácil control muscular que los bailarines ejercen sin esfuerzo visible. El exquisito porte, la casi ingravidez que exhibe una "ballerina absoluta" derivan de la interacción precisa y sutil de fuerza y contrafuerza, interacción perfectamente ajustada en el tiempo y en el espacio. Un defecto corriente de los sistemas humanos es la aplicación retrasada o precoz del esfuerzo corrector de la realimentación negativa. Pensemos, por ejemplo, en el aprendiz de conductor que, a consecuencia de percibir con retraso la necesidad de corregir su dirección, lleva el coche de lado a lado de la calzada a golpes de volante, en la tambaleante marcha del ebrio hacia el farol hasta que éste "salta y le golpea": el alcohol enlentece sus reacciones impidiéndole evitarlo a tiempo.

Cuando el cierre del bucle de un sistema de realimentación ostenta un retraso considerable, la corrección puede oscilar de realimentación negativa a positiva, especialmente cuando los acontecimientos tienen lugar en un lapso temporal breve. El fracaso, así pues, puede producirse a consecuencia de la oscilación, violenta a veces, del sistema dentro de sus límites. Tal posibilidad es aterradoramente cuando sus resultados son los bandazos de un coche, pero es también el origen del sonido de los

instrumentos musicales de viento, cuerda y electrónicos, así como de una amplísima gama —en constante expansión— de mecanismos electrónicos de toda índole.

Salta ahora a la vista que el sistema de control ingenieril es una de esas formas de protovida mencionadas previamente que aparecen allí donde haya la suficiente cantidad de energía libre. La única diferencia entre los sistemas vivos y los inertes reside en su grado de complejidad; según aumenta la complicación y las posibilidades de los sistemas mecánicos, esta distinción se difumina progresivamente. Si hemos logrado ya la inteligencia artificial o hemos de esperar todavía es materia de discusión. Entretanto, no podemos olvidar que, como la misma vida, los sistemas cibernéticos pueden constituirse a consecuencia de una cadena fortuita de acontecimientos: todo lo que se necesita para ello es abundancia de materias primas a partir de las cuales pueda construirse el sistema y de energía libre para hacerlo funcionar. El nivel de agua de muchos lagos naturales es notablemente independiente del caudal de los ríos que a ellos llegan; tales lagos no son otra cosa que sistemas de control inorgánicos naturales. Existen porque el perfil del río que los drena es tal que una pequeña modificación de la profundidad produce un cambio considerable en el volumen de la corriente, lo que implica que la profundidad del lago está controlada por un bucle de realimentación negativa de elevada ganancia. No debemos suponer que, aunque los sistemas abiológicos de esta clase puedan funcionar a escala planetaria, son productos deliberados de Gaia, ni descartar, por otra parte, que su aparición y desarrollo cumpla alguna función gaiana.

Este capítulo ha querido ser el bosquejo de cómo podría funcionar Gaia fisiológicamente. En este punto, donde Gaia aún no tiene una entidad muy definida, es simplemente una especie de mapa o diagrama de circuitos que comparemos con los hallazgos subsiguientes. Si damos con pruebas bastantes de que existen sistemas de control planetarios cuyos componentes son los procesos activos de animales y plantas y que poseen la capacidad de regular el clima, la composición química y la topografía de la Tierra, estaremos en posición de substanciar nuestra hipótesis y formular una teoría.

5. La atmósfera contemporánea

Uno de los puntos ciegos de la percepción humana ha sido la obsesión con los antecedentes. Hace tan sólo cien años, Henry Mayhew, hombre en otros aspectos sensible e inteligente, escribía sobre los pobres de Londres como si fueran miembros de otra raza. Cómo, si no, podrían ser tan diferentes de él, pensaba. En la época victoriana, el trasfondo familiar y social tenía una importancia equivalente a la que hoy se da en ciertos lugares al CI. En la actualidad, si alguien habla de pedigrí, lo más probable es que sea un granjero o un miembro de algún club de cría caballar o perruna. Es ésta la época, sin embargo, en la que a la hora de conseguir trabajo tanta importancia tiene el nivel educacional, la titulación universitaria, el curriculum académico. Son éstos los factores que suelen determinar la elección de un candidato entre el conjunto de solicitantes; pocas veces se intenta averiguar la valía real, el potencial auténtico de cada uno. Hasta hace pocos años, la mayoría de nosotros manteníamos una actitud igualmente tendenciosa cuando reflexionábamos sobre el planeta que habitamos, concentrando toda nuestra atención en su más remoto pasado. Se escribían y publicaban montañas de monografías, de artículos y de libros de texto sobre el registro geológico, sobre la vida en los océanos primigenios; estas miradas atrás parecían poder explicarnos cuanto necesitábamos saber sobre las características y el potencial de la Tierra. El resultado, tan bueno como seleccionar los aspirantes a un trabajo mediante el estudio de los huesos de los abuelos respectivos.

Gracias a todo el conocimiento que sobre nuestro planeta ha aportado y aporta aún la investigación espacial, gozamos, desde fecha bien reciente, de una perspectiva completamente nueva. Hemos podido contemplar desde la Luna a nuestro hogar planetario en su órbita alrededor del Sol y nos hemos dado cuenta repentinamente de que no somos ciudadanos de un planeta desdeñable, por despreciable y mezquina que, vista en primer plano, la contribución del hombre a este panorama pueda parecer. Ocurriera lo que ocurriera en el pasado remoto, somos indudablemente una parte viva incluida en una anomalía extraña y bella de nuestro sistema solar. Nuestra atención se ha desplazado a la Tierra que ahora podemos estudiar desde el espacio, a las propiedades de su atmósfera en particular. Nuestros conocimientos sobre la composición y el comportamiento del tenue velo gaseoso que envuelve al planeta, cuyas capas más próximas a la superficie exhiben una curiosa mezcla de gases activos que, si bien en recombinación perpetua, nunca dejan de estar en equilibrio y cuyos jirones externos penetran miles de kilómetros en el espacio unidos a su anfitrión planetario por una atracción gravitatoria ya muy debilitada, nuestros conocimientos sobre todo esto, repito, superan hoy ampliamente a los que pudiera haber intuido el más lúcido de nuestros antepasados. Antes, empero, de que imitando la acción de la bomba de hidrógeno nos proyectemos más allá de la atmósfera, amplíemos nuestras afirmaciones y establezcamos unos cuantos hechos.

En la atmósfera existen diversos estratos bien definidos. Un astronauta lanzado desde la superficie de la Tierra deja atrás, en primer lugar, la troposfera, la capa más densa y próxima al suelo. Región de unos diez

kilómetros de profundidad, donde se producen casi todos los acontecimientos climatológicos y que constituye el "aire" para casi todas las criaturas de respiración aérea, es en ella donde interactúan las partes vivas y las gaseosas de Gaia. Supone más de las tres cuartas partes de la masa total de la atmósfera. Ostenta una peculiaridad inesperada e interesante, de la que carecen los demás estratos atmosféricos: está dividida en dos partes, estableciéndose la línea divisoria entre ambas cerca del Ecuador. El aire de cada región no se mezcla libremente con el aire de la otra, como cualquiera que haya viajado en barco por regiones tropicales puede atestiguar; existe una nítida diferencia entre la claridad de los cielos meridionales y la relativa turbiedad de los septentrionales. Hasta hace muy poco era opinión general que los gases de la troposfera reaccionaban muy levemente entre ellos, salvo quizás durante el intenso calor generado por descargas eléctricas o fenómenos equivalentes. Hoy, gracias a las investigaciones pioneras que en materia de química atmosférica han realizado sir David Bates, Christian Junge y Marcel Nicolet, sabemos que los gases de la troposfera reaccionan con la intensidad de una llama fría de tamaño planetario y combustión lenta. Muchos de ellos se combinan con el oxígeno, desapareciendo como gases libres; tales reacciones son posibles en virtud de la energía solar que, mediante una compleja secuencia de acontecimientos, transforma las moléculas de oxígeno en compuestos de otro tipo —ozono, radicales hidróxilos y demás—; éstos, además de vehicularlos eficazmente, tienen más reactividad que él.

En alguna zona situada entre los diez y los dieciocho mil metros (según el punto de la corteza terrestre desde el que fuera lanzado) nuestro astronauta penetraría en la estratosfera, región cuyo nombre proviene de la dificultad que para mezclarse en sentido vertical tiene el aire en ella contenido, si bien soplan vientos cuyas velocidades alcanzan muchos centenares de kilómetros a la hora en sentido horizontal. La temperatura es sumamente baja en su límite inferior, la denominada tropopausa, pero asciende según nos desplazamos hacia arriba. La naturaleza de los dos estratos hasta ahora atravesados por nuestro astronauta está íntimamente asociada con los gradientes de temperatura detectables en el interior de cada uno. En la troposfera, donde por cada centenar de metros de ascenso la temperatura desciende aproximadamente 1° C, es fácil el movimiento vertical del aire y la regula la formación de nubes. En la estratosfera, donde la temperatura se incrementa con la altitud, el aire caliente muestra resistencia a subir, siendo norma, por tanto, la estabilidad estratificada. A la radiación solar ultravioleta más dura y poderosa corresponde la fragmentación de las moléculas de oxígeno en sus átomos constituyentes, aunque suelen tardar poco en recombinarse de nuevo, a menudo en forma de ozono. Este sufre también la acción separadora de los rayos ultravioletas, estableciéndose el equilibrio con una densidad máxima de ozono de cinco partes por millón. El aire de la estratosfera no es mucho más denso que el de Marte: no existe forma de vida de respiración aérea que pueda sobrevivir en ella. Si se utilizara un entorno presurizado para solventar el problema de la baja presión no habría forma de vida que pudiera resistir el envenenamiento por ozono. Como las tripulaciones y pasajeros de ciertas aeronaves que sirven trayectos largos y vuelan a gran

altura han descubierto recientemente con riesgo para su salud y sensaciones muy desagradables, al aire estratosférico no puede respirarse aunque se le proporcione la temperatura y la presión adecuadas antes de hacerlo pasar el interior de la cabina. El smog, por comparación, resulta bastante más saludable.

La química de la estratosfera es asunto del mayor interés para los científicos académicos. Innumerables reacciones químicas tienen lugar bajo condiciones puramente abstractas de fase gaseosa, sin que, como en el caso de los recipientes del laboratorio, haya paredes que echen a perder la perfección del experimento. No es sorprendente, por lo tanto, que casi toda la labor científica relacionada con la química atmosférica se haya concentrado en la estratosfera y las zonas que quedan por encima de ella. Esta especialidad tiene hasta una designación específica, aeronomía química, acuñada por Sidney Chapman, uno de sus más cualificados representantes. Y sin embargo, salvo por las repercusiones —aducidas, pero no probadas— de los cambios en la concentración de ozono, la relación entre la biosfera y las capas superiores de la atmósfera parece tener menos entidad que la establecida por los científicos que las convierten en su objeto de estudio. Si hago esta puntualización no es por afán crítico, sino para dejar constancia de que la ciencia tiende a concentrarse en lo que puede medirse y discutirse. A consecuencia de esta actitud, la troposfera, que es la parte más voluminosa de la atmósfera y ciertamente la de mayor relevancia para Gaia, se conoce bastante menos. Por encima de la estratosfera está la ionosfera, donde la rarificación del aire es muy intensa; el ritmo de las reacciones químicas es también más vivo en razón de lo tenue del filtro que se interpone en el camino de los rayos solares. En estas regiones, la mayoría de las moléculas, no sólo el nitrógeno y el CO₂, son escindidas en los átomos que las constituyen. Algunos de éstos sufren ulterior fragmentación, convirtiéndose en iones positivos y electrones; ello da lugar a la formación de estratos eléctricamente conductores que, en la época anterior a los satélites de comunicaciones fabricados por el hombre, eran importantes por su capacidad para reflejar las ondas de radio, permitiendo la comunicación entre puntos alejados del planeta.

La capa más externa de todas, la exosfera, tan rarificada que contiene únicamente algunos centenares de átomos por centímetro cúbico, puede pensarse como algo que se prolonga sin solución de continuidad con la también tenue atmósfera externa del Sol. Solía decirse que al escape de átomos de hidrógeno desde la exosfera debe la Tierra su atmósfera oxigenada. Hoy, sin embargo, nos parece dudoso que este proceso tenga lugar a escala suficiente para repercutir en la cantidad de oxígeno; parece, además, que el flujo de átomos de hidrógeno procedente del Sol compensa o supera incluso los que escapan de la exosfera. La Tabla 3 recoge los principales gases reactivos del aire, sus concentraciones, sus tiempos de permanencia y sus fuentes más importantes.

Como ya expliqué anteriormente, empecé a pensar en la posibilidad de que la atmósfera terrestre fuera un ensamblaje biológico y no sólo una colección inerte de gases mientras intentábamos validar empíricamente la teoría de que era posible dilucidar la existencia o no de vida en un

planeta estudiando la composición química de su atmósfera. Los experimentos que la confirmaron nos convencieron al mismo tiempo de que la atmósfera terrestre era una mezcla tan curiosa e improbable que su producción y mantenimiento no podían deberse al mero azar. Aparecían por todas partes transgresiones a las normas del equilibrio químico y, sin embargo, en el seno de este desorden aparente se mantenían constantes, de alguna forma, unas condiciones favorables para la vida. Cuando acaece lo inesperado y no puede achacarse a la casualidad, lo procedente es buscar una explicación racional. Veamos, pues, si la hipótesis de la existencia de Gaia nos sirve para explicar la extraña composición de nuestra atmósfera, dado que según ella es la biosfera la que mantiene y controla activamente el aire dentro del cual vivimos, suministrando de tal modo un entorno óptimo para la vida del planeta. Para confirmar o negar este supuesto examinaremos la atmósfera de modo muy parecido a cómo el fisiólogo estudia los componentes de la sangre, cuando lo hace preguntándose de qué forma contribuye cada uno de ellos a mantener viva la criatura de la que proceden.

Tabla 3. Algunos gases químicamente reactivos del aire.

Gas	Cantidad %	Flujo en megatoneladas	Medida del desequilibrio	Posible función incluida En la hipótesis Gaia
Nitrógeno	79	300	10^{10}	Aumento de la presión Extinción de incendios Alternativa del nitrato marítimo
Oxígeno	21	100.000	Ninguno. Tomado como referencia	Gas de referencia energética
Dióxido de carbono	0,03	140.000	10	Fotosíntesis Control Climático
Metano	10^4	1.000	Infinito	Regulación de Oxígeno Regulación de la zona anaerobia.
Oxido nitroso	10^5	100	10^{13}	Regulación de Oxígeno Regulación de ozono
Amoniaco	10^6	300	Infinito	Control de pH Control climatológico (épocas remotas)
Gases azufrados	10^8	100	Infinito	Transporte de gases del ciclo del azufre
Cloruro de metilo	10^7	10	Infinito	Regulación de ozono
Yoduro de metilo	10^{10}	1	Infinito	Transporte de yodo

Nota: En la columna 4, infinito significa más allá de los límites del cálculo.

Desde el punto de vista químico, aunque no en términos de abundancia, el gas dominante en el aire es el oxígeno. Es este elemento el que establece el nivel referencial de energía química a todo lo largo y ancho del planeta, nivel que hace posible encender fuego —dada una sustancia

combustible— en cualquier punto de la Tierra. Ofrece una diferencia de potencial químico lo bastante amplia para que los pájaros puedan volar y nosotros podamos correr y mantener nuestra temperatura cuando la exterior desciende; quizá, incluso, hasta pensar. El nivel actual de la tensión de oxígeno representa para la biosfera contemporánea lo mismo que el suministro de electricidad de alto voltaje para nuestra sociedad de hoy. Las cosas pueden continuar sin electricidad, pero las potencialidades menguan substancialmente. La comparación es bastante exacta, porque en química, el poder oxidante de un entorno se expresa, por convenio, en términos de su potencial redox (potencial de oxidación-reducción), medido eléctricamente y cuya unidad es el voltio. El potencial redox mediría en realidad el voltaje de una hipotética pila que tiene uno de sus polos conectado al oxígeno y el otro a las sustancias nutritivas. Casi todo el oxígeno que genera la fotosíntesis de las plantas verdes se introduce en la atmósfera para ser utilizado en esa otra actividad fundamental de la vida, la respiración, en un lapso de tiempo relativamente corto. Este proceso complementario, la respiración, jamás resultará, obviamente, en un aumento neto del oxígeno: ¿cómo se ha acumulado entonces este gas en la atmósfera? Hasta fecha reciente se pensaba que la fuente principal era la fotólisis del vapor de agua en las capas superiores: las moléculas de agua escindidas liberan átomos de hidrógeno lo bastante ligeros para escapar al campo gravitatorio terrestre y átomos de oxígeno que se unen de dos en dos para formar moléculas de dicho gas o de tres en tres para dar moléculas de ozono. Cierto es que este proceso produce un incremento neto del oxígeno pero, por muy importante que pudiera ser éste en el pasado, en la biosfera contemporánea es una fuente desdeñable. Parece haber pocas dudas sobre la identidad de la fuente principal del oxígeno atmosférico; a Rubey corresponde el honor de haber sido el primero en establecerla (1951). Las rocas sedimentarias contienen una pequeña proporción del carbono que los vegetales habían fijado en la materia orgánica de sus tejidos. Aproximadamente el 0,1 por ciento del carbono fijado anualmente es enterrado con los restos vegetales que, procedentes de las masas terrestres, terminan en los cursos fluviales o en los mares. Cada átomo de carbono que de tal forma es extraído del ciclo fotosíntesis-respiración significa una molécula más de oxígeno en el aire. Si no fuera por este proceso, el oxígeno desaparecería gradualmente de la atmósfera al ir reaccionando con las sustancias reductoras que la climatología, los terremotos y los volcanes hacen llegar a la superficie.

Se dice, un tanto cínicamente, que la eminencia de un científico viene dada por lo prolongado del tiempo que es capaz de impedir el progreso de su especialidad. Pasteur, por ejemplo, cuyo sitio está entre los más grandes, no ha sido la excepción de tal regla. A él se debe la noción de que, con anterioridad a la aparición del oxígeno en el aire, sólo eran posibles formas de vida de baja categoría. Esta suposición ha sido popular durante mucho tiempo pero, como indicábamos en el capítulo 2, se cree actualmente que incluso los primeros organismos fotosintetizadores disponían de un potencial químico tan alto como el utilizado por los microorganismos actuales. En los primeros tiempos, el amplio gradiente de energía potencial actualmente suministrado por el oxígeno estaba

disponible tan sólo en el espacio intracelular de los citados microorganismos. Después, según se multiplicaban, se amplió a su microambiente y continuó extendiéndose más y más, marchando al mismo paso que la vida, hasta que se completó la oxidación de las sustancias reductoras primigenias y el oxígeno pudo por fin aparecer en el aire. Desde el principio, sin embargo, la diferencia de energía potencial entre los oxidantes de las células de los fotosintetizadores y el ambiente reductor externo era tan grande como la que hoy existe entre el oxígeno extracelular y los nutrientes intracelulares.

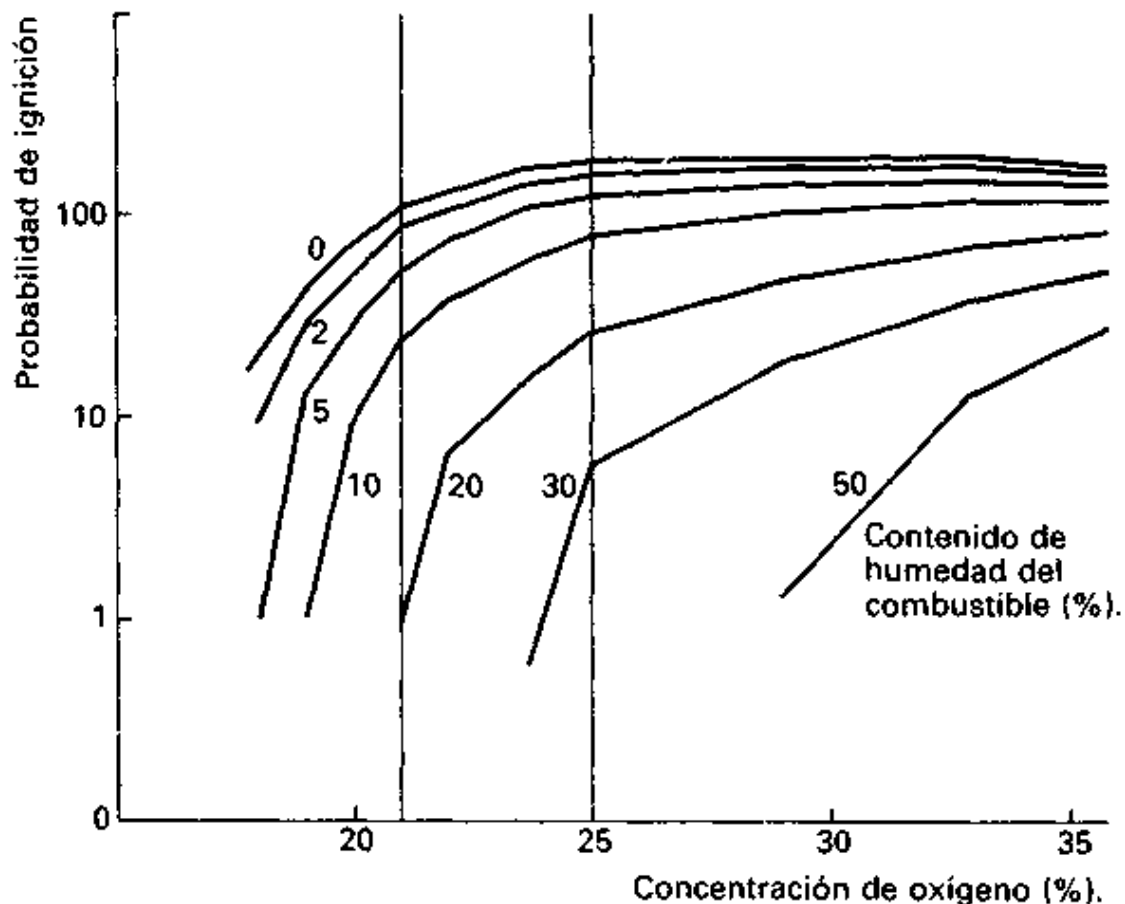


Fig. 5. El diagrama muestra la probabilidad de incendios forestales en atmósferas con diferente contenido de oxígeno. Los fuegos naturales se inician por combustión espontánea o a consecuencia de la caída de rayos. Su probabilidad depende en gran medida del contenido de humedad de los combustibles naturales. En la figura, cada línea corresponde a una humedad diferente, de sequedad completa(0%), a visiblemente mojado (45%). Con un porcentaje de oxígeno del 21% —el actual— los incendios no prenden cuando el contenido de humedad es superior al 15%. Cuando el contenido de oxígeno asciende al 25%, hasta los brotes empapados y la hierba de una pluvisilvia se inflamarían.

Las fuentes de potenciales altos, ya sean eléctricos o químicos, son peligrosas, y el oxígeno conlleva riesgos especiales. Nuestra atmósfera actual, cuyo nivel de oxígeno es del 21 por ciento, se halla en el límite superior del intervalo seguro para la vida. Por poco que aumentara esta cifra el peligro de incendio crecería vertiginosamente. La probabilidad de incendio forestal a consecuencia de la caída de rayos subiría un 70 por ciento por cada 1 por ciento de aumento del presente nivel. Si éste

sobrepasara el 25 por ciento, muy poca vegetación sobreviviría a los devastadores incendios, que arrasaría tanto la pluvisilvia tropical como la tundra ártica. Andrew Watson, de la Universidad de Reading, ha confirmado experimentalmente estos supuestos, estableciendo la probabilidad de incendio para diferentes concentraciones de oxígeno en unas condiciones muy semejantes a las existentes en las auténticas selvas. El diagrama adjunto (fig. 5) muestra los resultados.

El actual nivel de oxígeno está en un punto donde el riesgo y el beneficio se equilibran confortablemente. Claro que estallan fuegos forestales, pero sin que su frecuencia sea tan elevada como para estorbar la alta productividad que un nivel de oxígeno del 21 por ciento permite, y de nuevo nos hallamos ante una situación superponible a la del suministro eléctrico: si aumentamos el voltaje, la cantidad de energía disipada en el transporte y el cobre necesario para los cables disminuyen enormemente, pero por encima de los 250 voltios el peligro de incendio y de muerte por shock aumentaría de tal modo que las ventajas antedichas no serían justificables. Los ingenieros de una central eléctrica no permitirían jamás que su equipo funcionara al buen tuntún; está diseñado para un funcionamiento preciso, para garantizar un suministro constante de energía eléctrica segura. ¿Cómo se controla entonces el nivel de oxígeno del aire? Antes de pasar a discutir la naturaleza de este sistema de regulación biológica es necesario examinar más detalladamente la composición de la atmósfera. El estudio de un único gas a través de telescopios, microscopios u otros instrumentos nos dice poco de su relación con los restantes componentes atmosféricos; algo parecido a intentar comprender el significado de una frase escrutando una sola de sus palabras. Para extraer información de la atmósfera hay que considerarla en su conjunto; examinaremos, pues, el oxígeno, nuestro gas de referencia energética, aproximándolo a otros gases de la atmósfera con los que puede reaccionar y reacciona. Empecemos por el metano.

Hutchinson fue el primero en señalar, hace treinta años, que el metano, conocido también como gas de los pantanos, era un producto biológico cuya fuente principal estaba en las ventosidades de los rumiantes. Aunque no negaremos la importancia de esta contribución, sabemos actualmente que el origen de la fracción capital de este gas es la fermentación bacteriana de los fangos y sedimentos depositados en lechos marinos, ciénagas, terrenos anegados y estuarios fluviales, lugares todos donde tiene lugar enterramiento de carbono. La cantidad de metano producida de esta forma es asombrosamente grande: por lo menos 1.000 millones de toneladas anuales. (El gas "natural" bombeado al interior de nuestros hogares es de estirpe bien distinta; se trata de gas fósil, del equivalente gaseoso del carbón y el petróleo. Presente en cantidades triviales a escala planetaria, sus pequeñas reservas se habrán agotado dentro de unos diez años.)

Dentro del contexto de una biosfera autorregulada y mantenedora activa del entorno gaseoso en el óptimo para la vida, resulta legítimo que nos preguntemos cuál es la función de un gas como el metano: no resulta más ilógico que interrogarnos sobre la función de la glucosa o de la insulina en la sangre. Si suprimimos el contexto Gaia la pregunta pierde todo su sentido, convirtiéndose en algo que podría ser rechazado como

incoherente o circular, razón por la cual, probablemente, no ha sido formulada mucho antes.

¿Cuál es, pues, la función del metano y cómo se relaciona con el oxígeno? Cometido obvio es mantener la integridad de las zonas anaerobias de las que proviene. Las incesantes burbujas de metano que ascienden hacia la superficie de los barros fétidos las limpian de sustancias volátiles venenosas (los compuestos metálicos de arsénico y plomo, por ejemplo), además de librarlas del oxígeno, elemento venenoso para los microorganismos anaerobios. Cuando el metano alcanza la atmósfera, se comporta como un regulador bidireccional de oxígeno, capaz de retener a un nivel y de devolver a otro. Parte llega a la estratosfera antes de que la oxidación lo convierta en dióxido carbónico y vapor de agua; es la fuente principal de éste en las capas altas de la atmósfera. El agua termina por disociarse en oxígeno, que desciende, e hidrógeno, que escapa al espacio. Este proceso asegura, a largo plazo, un pequeño incremento del oxígeno (pequeño pero posiblemente significativo). Si la situación está equilibrada, el escape de hidrógeno siempre significa una ganancia neta de oxígeno.

Por el contrario, la oxidación del metano en las capas inferiores de la atmósfera significa la utilización de enormes cantidades de oxígeno, del orden de las 2.000 megatoneladas anuales. Este proceso se realiza pausada pero continuamente en el aire que nos rodea mediante una serie de reacciones complejas e intrincadas, que el trabajo de Michael Me Elroy y sus colaboradores ha desentrañado en gran parte. Un sencillo cálculo aritmético nos indica que, en ausencia de metano, la concentración de oxígeno crecería un 1 por ciento en 12.000 años, cantidad excesiva para tan pequeño lapso de tiempo: un cambio peligroso y, en la escala temporal geológica, demasiado rápido.

La teoría del equilibrio de oxígeno (Rubey), desarrollada por Holland, Broecker y otros científicos eminentes, afirma que la cantidad de oxígeno se mantiene constante gracias al equilibrio entre la ganancia consustancial al enterramiento del carbono, por una parte, y la pérdida que supone la reoxidación de los materiales reducidos procedentes de las profundidades de la Tierra, por otra. La biosfera es, sin embargo, una máquina demasiado poderosa para dejar el control de su funcionamiento a cargo únicamente de lo que los ingenieros llaman un sistema de control pasivo, como si en la central eléctrica la presión de la caldera estuviera determinada por el equilibrio entre la cantidad de fuel quemado y la cantidad de vapor necesaria para mover las turbinas. Cuando la demanda descendiera —en los domingos soleados, por ejemplo— la presión aumentaría hasta poner a la caldera en peligro de explosión y, en los períodos de máxima demanda, la presión caería en picado, siendo imposible suministrar la energía pedida. Por este motivo, los ingenieros utilizan sistemas de control activo que, como explicábamos en el capítulo 4, incorporan sensores. En el caso de la central, el sensor de presión o temperatura registraría cualquier desviación respecto a las condiciones óptimas empleando una pequeña cantidad de la energía del sistema para modificar el ritmo de quemado del combustible.

La permanencia del valor de la concentración de oxígeno señala, por lo

tanto, la presencia de un sistema de control activo, provisto presumiblemente de algún mecanismo de detección y señalización de las desviaciones respecto a la concentración óptima, ligado quizá a los procesos de producción de metano y de enterramiento de carbono. Una vez que los materiales carbonáceos alcanzan las zonas anaeróbicas profundas, o se convierten en metano o son enterrados. En la actualidad, la cantidad de carbono utilizado para producir esa cifra anual de 1.000 megatoneladas es veinte veces superior al carbono enterrado. De ello se desprende que cualquier mecanismo capaz de modificar esta proporción será un eficaz regulador del oxígeno. Quizá, cuando la tasa de oxígeno atmosférico se hace excesiva, se genere algún tipo de señal que desencadene una mayor producción de metano; el paso de este gas regulador a la atmósfera pronto restablecería el amenazado equilibrio.

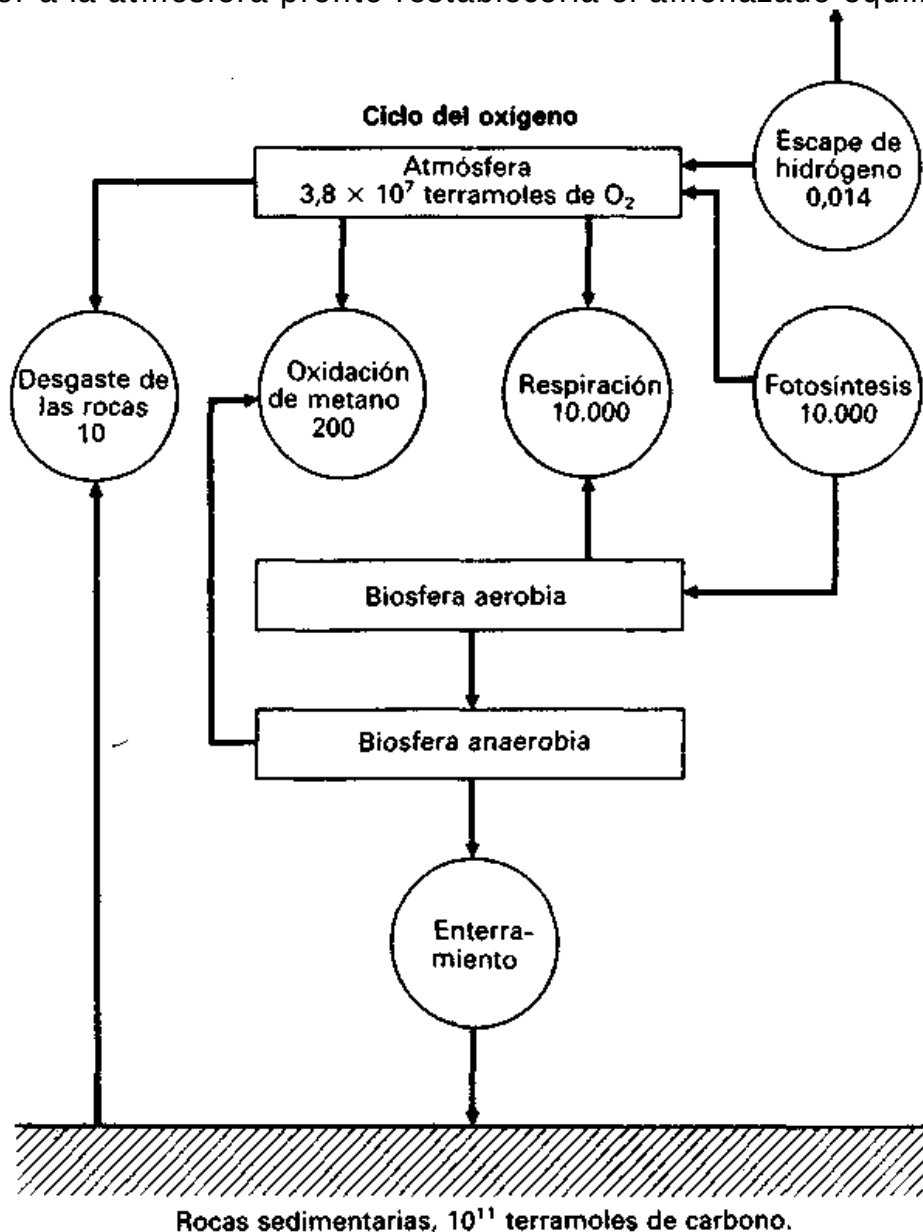


Fig. 6. Representación esquemática de la circulación de oxígeno y carbono entre los principales depósitos de la atmósfera, los océanos y la corteza terrestre. Las cifras son de terramoles, que para el carbono equivale a 12 megatoneladas y para el oxígeno a 32. Las cifras del interior de los círculos indican flujos anuales. Las cifras de los depósitos, la atmósfera y las rocas sedimentarias son índice de su tamaño. Observe cómo el carbono, que en sentido descendente marcha hacia los estratos sedimentarios que se hallan bajo

mares y pantanos, es devuelto a la atmósfera, sobre todo, en forma de "gas de los pantanos", de metano.

Vemos, pues, cómo la energía aparentemente derrochada en la oxidación de metano es el precio inevitable de un regulador activo, constante y de acción rápida. No deja de ser curioso pensar que, sin el auxilio de la microflora anaerobia cuya morada está en los malolientes barros de lechos marinos, lagos y estanques, quizá no existieran ni escritores, ni lectores, ni libros, porque sin el metano por ella generado la concentración de oxígeno ascendería inexorablemente hasta un nivel en el que todo incendio cobraría proporciones desmesuradas, haciendo imposible cualquier otra forma de vida diferente a la microflora de los terrenos pantanosos.

El óxido nitroso es otro desconcertante gas atmosférico. Es hoy un gas cuya concentración aérea es, como la del metano, baja; un tercio de parte por millón, cantidad que también como en el caso del metano, no guarda ninguna proporción con el volumen producido por los microorganismos terrestres y marinos, responsables de entre 100 y 300 megatoneladas por año, aproximadamente la cantidad de nitrógeno devuelto al aire. Si hay abundancia de nitrógeno y escasez de óxido nitroso se debe a que el primero es un gas muy estable y se acumula, mientras el óxido nitroso es destruido rápidamente por la radiación ultravioleta del Sol.

Podemos tener la seguridad de que los derroches energéticos por parte de la biosfera son altamente improbables: si se destina una importante cantidad de energía a producir este extraño gas es porque cumple alguna función útil. Se me ocurren dos posibles usos, y de acuerdo con el tópico de que en biología una determinada sustancia siempre sirve para más de una cosa, ambos podrían ser importantes. En primer lugar, podría estar implicado, como el metano, en la tarea de la regulación del oxígeno. El volumen de oxígeno que desde el suelo y los lechos marinos transporta el óxido nitroso es dos veces la cantidad necesaria para equilibrar las pérdidas producidas por la oxidación de las materias reductoras llegadas constantemente a la superficie de la Tierra desde su interior. Podría actuar, por lo tanto, como contrapeso del metano. Es por lo menos verosímil que la producción de uno y otro sean complementarias; ambas podrían ser reguladores rápidos de la concentración de oxígeno.

La segunda función importante del óxido nitroso está relacionada con su comportamiento en la estratosfera donde se descompone, entre otras cosas, en óxido nítrico. Se ha señalado a este compuesto como responsable de una acción catalíticamente destructiva sobre la capa de ozono, situación aparentemente alarmante a la vista de las advertencias formuladas por muchos ecologistas respecto a que la peor amenaza para nuestro mundo es la destrucción de la capa estratosférica de ozono por la acción de las aeronaves supersónicas y los productos contenidos en los aerosoles. De hecho, si los óxidos de nitrógeno destruyen el ozono, la naturaleza agrade a la antedicha capa desde hace mucho,

pero que mucho tiempo. Un exceso de ozono sería tan malo como carecer de él; el ozono, del mismo modo que los demás componentes de la atmósfera, tiene también un óptimo deseable. Si se incrementara en

cuantía superior al 15 por ciento se producirían repercusiones negativas en el clima. Sabemos además, con toda certeza, que la radiación ultravioleta tiene aspectos útiles y beneficiosos, y una capa de ozono más densa podría impedir su llegada a la Tierra en dosis suficientes. En los seres humanos, la vitamina D se forma en la piel a resultas de la acción ejercida sobre ella por los rayos ultravioletas. Si una radiación ultravioleta excesiva puede favorecer el cáncer de piel, su debilitamiento producirá raquitismo con toda seguridad. Aunque la producción de óxido nítrico por parte de los indicados microorganismos no nos beneficie directamente, la radiación ultravioleta de bajo nivel podría ser de importancia para otras especies en procesos aún por descubrir. Como regulador al menos —junto a otro gas atmosférico de origen biológico recientemente descubierto, el cloruro de metilo— podría ser valioso. El sistema de control de Gaia incluiría también un medio para detectar la cantidad de ultravioleta filtrada a través de la capa de ozono, regulándose subsiguientemente la producción de óxido nítrico.

Otro gas nitrogenado que la atmósfera y los mares producen en abundancia es el amoníaco. Aunque es un gas de difícil medida, se calcula que su producción no es inferior a las 1.000 megatoneladas anuales, tarea para la cual la biosfera (el amoníaco es ahora exclusivamente de origen biológico) consume gran cantidad de energía. La función de este gas es, casi con toda seguridad, controlar la acidez ambiental. Teniendo en cuenta los ácidos que la oxidación del nitrógeno y el azufre producen, el amoníaco generado por la biosfera es justamente el necesario para mantener alrededor de 8 el pH de la lluvia, cifra óptima para la vida. De faltar el amoníaco, este pH caería hasta un valor de 3, acidez comparable a la del vinagre; esto ya sucede en ciertas partes de Escandinavia y de Norteamérica, con efectos desastrosos para el desarrollo vegetal. La causa de este fenómeno serían los humos desprendidos por la combustión de los combustibles industriales y domésticos en áreas densamente pobladas: la mayoría de estos combustibles contienen azufre que, expelido a la atmósfera, vuelve al suelo con la lluvia en forma de ácido sulfúrico.

La vida tolera una cierta acidez; de ello son prueba los jugos digestivos de nuestros estómagos. Un entorno tan ácido como el vinagre, sin embargo, se halla muy lejos de ser el ideal. Es verdaderamente una suerte que los ácidos y el amoníaco estén equilibrados, que la lluvia no sea ni demasiado ácida ni demasiado alcalina. Si aceptamos la hipótesis del mantenimiento activo de este equilibrio mediante el sistema cibernético de control de Gaia, el costo energético de la producción amoniacal habrá de cargarse a la cuenta total de la fotosíntesis.

El constituyente más abundante de la atmósfera es, con gran diferencia, el nitrógeno gaseoso; supone el 79 por ciento del aire respirable. Los dos átomos de su molécula están unidos por un enlace químico de los más potentes, lo que le confiere una notable falta de reactividad. Se ha acumulado en la atmósfera a causa de la acción de las bacterias desnitrificantes y de otros procesos biológicos. Ciertos procesos inorgánicos, como las tormentas, lo devuelven lentamente al mar, su habitat natural.

Pocos se percatan de que no es el gas la forma estable del nitrógeno,

sino el ion nitrato disuelto en el mar. Como vimos en el capítulo 3, si la vida desapareciera, la mayor parte del nitrógeno atmosférico terminaría por combinarse con el oxígeno volviendo al mar en forma de nitrato. ¿Qué ventajas obtiene la biosfera de bombear nitrógeno a la atmósfera además del mantenimiento del equilibrio químico? En primer lugar, la estabilidad del clima quizá requiera la actual densidad atmosférica y el nitrógeno resulta conveniente para incrementar la presión. En segundo, un gas de reactividad escasa como el nitrógeno es lo más adecuado para diluir el oxígeno del aire; como hemos visto en páginas anteriores, una atmósfera de oxígeno puro tendría consecuencias desastrosas. En tercer lugar, si la totalidad del nitrógeno estuviera en los mares como ion nitrato, el siempre delicado problema de mantener la salinidad lo bastante baja para permitir la vida, empeoraría. Como veremos en el capítulo siguiente, la membrana celular es extremadamente vulnerable a la salinidad de su entorno; una salinidad total por encima de 0,8 molar la destruye, con independencia de que se trate de cloruro, de nitrato o de una mezcla de ambos. Si todo el nitrato estuviera en los mares como ion nitrato, la molaridad pasaría de 0,6 a 0,8: ello significaría la incompatibilidad del agua marina con casi todas las formas conocidas de vida. Señalemos finalmente que además de su efecto sobre la salinidad marina, las concentraciones altas de nitrato son venenosas. La adaptación a un entorno con fuerte contenido de nitratos habría sido más difícil y más onerosa energéticamente para la biosfera que el simple almacenamiento del nitrógeno en la atmósfera, donde además resulta de cierta utilidad. Cualquiera de las posibilidades expuestas podría, pues, constituir un motivo válido para justificar la existencia de los procesos biológicos que transportan nitrógeno desde la superficie a la atmósfera.

La cuantía de un gas atmosférico no es, evidentemente, medida de importancia. El amoníaco, por ejemplo, cien millones de veces menos abundante que el nitrógeno, tiene una función reguladora tan importante como la de éste. En realidad, la producción anual de amoníaco es tan cuantiosa como la de nitrógeno, pero su remoción es mucho más rápida. La abundancia de los gases de la atmósfera depende mucho más de su tasa de reactividad que de su tasa de producción, como demuestra el hecho de que los gases menos abundantes suelen ser actores principales en los procesos de la vida.

El descubrimiento de las intrincadas reacciones químicas acaecidas entre los gases de la atmósfera ha sido una de las aportaciones más valiosas de la química moderna. Sabemos ahora, por ejemplo, que gases vestigiales como el hidrógeno y el monóxido de carbono son productos intermedios de la reacción entre el metano y el oxígeno, pudiendo, por lo tanto, ser también considerados gases biológicos como sus progenitores. Otros muchos gases activos —ozono, óxido nítrico, dióxido de nitrógeno— caen dentro de esta categoría; en ella están también unas sustancias muy reactivas de vida efímera, denominadas por los químicos radicales libres. Uno es el radical metilo, primer producto de la oxidación del metano. Unos 1.000 millones de toneladas pasan anualmente por la atmósfera, aunque en razón de su cortísima vida —menos de un segundo— no suele haber más de uno por centímetro cúbico de aire. No es éste el lugar apropiado

para describir detalladamente la compleja química de tales sustancias, pero resultan interesantes para quienes quieran saber algo más de los gases atmosféricos.

Los así llamados gases nobles y raros del aire no son particularmente raros ni enteramente nobles. Hubo una época en la que se les suponía resistentes al ataque de cualquier agente químico; en otras palabras, pasaban el test del ácido como esos metales también calificados de nobles (oro y platino). Hoy se sabe que el kriptón y el xenón forman compuestos. El gas más abundante de este grupo es el argón que, con el helio y el neón, supone casi el 1 por ciento de la atmósfera, lo que parece en contradicción con el remoquete de raro. Estos gases inertes son de inequívoco origen inorgánico y resultan de utilidad para establecer con mayor claridad el inerte telón de fondo contra el que destaca la vida.

Los gases producidos por la actividad humana —los fluorocarbonos, por ejemplo— proceden fundamentalmente de la industria química; ni que decir tiene que no aparecieron en el aire hasta la llegada de la era industrial. Son también buena prueba de la presencia de vida activa. Tras descubrir propelentes de aerosol en nuestra atmósfera, un visitante del espacio exterior tendría pocas dudas sobre la existencia de vida inteligente en nuestro planeta. Nuestro persistente y autoimpuesto apartamiento de la naturaleza suele hacernos pensar que los productos industriales están en las antípodas mismas de lo "natural": en realidad, habida cuenta de que son el resultado de la actividad de un grupo de seres vivos, la especie humana, resultan a la postre tan naturales como todos los demás compuestos químicos de la Tierra. Obviamente en ocasiones son productos agresivos, peligrosos o incluso letales, como los gases nerviosos, pero ninguno de ellos supera en toxicidad a la toxina fabricada por el bacilo *botulinus*.

Llegamos por último a esos dos componentes esenciales de la atmósfera y de la vida misma, el dióxido de carbono y el vapor de agua. Su importancia para la vida es fundamental, pero es difícil determinar si están regulados biológicamente. Para la mayoría de los geoquímicos, el contenido atmosférico de CO₂ (0,03 por ciento) se mantiene constante a corto plazo gracias a sencillas reacciones con el agua del mar. O, para satisfacer a los de gustos más técnicos: el dióxido de carbono y el agua están en equilibrio con el ácido carbónico y su anión disuelto.

La cantidad de CO₂ que, laxamente fijada de este modo, contienen los océanos, es casi cincuenta veces superior a la del aire. Si la tasa atmosférica disminuyera por una u otra causa, bastaría liberar una pequeña parte de la enorme reserva oceánica para restablecer la normalidad. En nuestra época, por contra, el CO₂ de la atmósfera está aumentando debido al quemado de combustibles fósiles. Suponiendo que mañana interrumpiéramos el consumo de estos combustibles, no haría falta mucho tiempo (quizá unos treinta años) para que este incremento desapareciera, restableciéndose el equilibrio entre la cantidad de gas del aire y de bicarbonato en el mar. A consecuencia del quemado de combustibles fósiles, el CO₂ del aire ha aumentado aproximadamente un 12 por ciento. En el capítulo 7 se examinan las consecuencias de esta modificación causada por el hombre.

Si Gaia regula el CO₂, es más probable que lo haga indirectamente, ayudando al restablecimiento del equilibrio, que oponiéndose frontalmente al aumento del gas. Volviendo a nuestra analogía de la playa, se trataría de alisar deliberadamente un área irregular antes de empezar a construir el castillo. No resulta fácil, sin embargo, distinguir entre estados de equilibrio naturales e inducidos; podríamos estar ante uno de esos veredictos basados exclusivamente en pruebas circunstanciales.

A largo plazo (es decir, en la escala temporal geológica) creemos, con Urey, que el equilibrio entre las rocas silíceas y carbonosas del suelo marino y la corteza terrestre proporcionará reservas de CO₂ aún mayores, asegurando un nivel constante de este gas. Siendo así las cosas, ¿se necesita la intervención de Gaia? La respuesta es que podría ser muy necesaria si los ajustes no se realizan con la celeridad suficiente para el conjunto de la biosfera. Es algo parecido a la situación de quien una mañana invernal no puede salir de casa porque la nieve bloquea la puerta. Sabe, naturalmente, que el obstáculo terminaría por desaparecer espontáneamente, pero ello no le impide apresurarse a retirarlo.

Son muchos los signos de impaciencia que, en el caso del CO₂, muestra Gaia ante la lentitud del restablecimiento del equilibrio. En la mayoría de los seres vivos se detecta la enzima anhidrasa carbónica, cuya función es acelerar la reacción entre el dióxido de carbono y el agua; los lechos marinos reciben una constante lluvia de conchas, ricas en carbonatos, que eventualmente forman conglomerados de rocas calcáreas o cretáceas, impidiéndose así el estancamiento del CO₂ en las capas superficiales del mar; finalmente, el doctor A. E. Pringwood ha sugerido que la incesante fragmentación del suelo y las rocas causada, en mayor o menor grado, por todas las formas de vida acelera la reacción entre el dióxido de carbono, el agua y las rocas carbonosas.

No parece descabellado pensar que, sin la interferencia de la vida, el CO₂ se acumularía en el aire hasta alcanzar niveles peligrosos. En cuanto gas "invernadero", su presencia junto al vapor de agua en la atmósfera contemporánea eleva notablemente la temperatura: si, a causa de la combustión de combustibles fósiles, el nivel de CO₂ creciera demasiado rápidamente para las fuerzas inorgánicas del equilibrio, la amenaza de sobrecalentamiento podría resultar seria, pero, por fortuna este gas "invernadero" interactúa intensamente con la biosfera. El CO₂ no es sólo fuente de carbono para la fotosíntesis; son muchos también los organismos heterotróficos (es decir, no fotosintéticos) que lo captan de la biosfera y lo convierten en materia orgánica. Hasta los animales —cuya respiración es, desde luego fuente de CO₂— incorporan a sus organismos pequeñas cantidades de este gas atmosférico. En realidad, cuanto mayor parece ser la importancia de los procesos del equilibrio inorgánico en la determinación de la cuantía atmosférica de un gas, mayor puede ser su interacción con la biosfera, y ello no es de extrañar si se piensa que ésta controla activamente su entorno y utiliza las condiciones dadas en su propio beneficio.

La relación de la biosfera con el dióxido de hidrógeno, esa substancia versátil y extraña, también conocida como agua, sigue un modelo parecido aunque es todavía más fundamental. Aunque el ciclo del agua —de los

océanos a la atmósfera y de ésta a las masas de tierra— extrae su energía básicamente de la radiación solar, la vida participa a través del proceso de transpiración. La luz del Sol puede evaporar agua de los mares, agua cuyo destino es precipitarse sobre la tierra, pero lo que la luz solar no hace espontáneamente en la superficie de la Tierra es separar el oxígeno del agua ni establecer las reacciones que determinan la síntesis de sustancias y estructuras complejas.

La Tierra es el planeta del agua. Sin ella no habría aparecido la vida, dependiente aún por completo de su imparcial generosidad. Es el trasfondo último de referencia. Todas las desviaciones del equilibrio podrían ser consideradas como desviaciones del nivel de referencia-agua. Las propiedades de acidez, alcalinidad y potenciales redox son estimadas en relación a la neutralidad del agua. La especie humana toma el nivel medio del mar como base de referencia a partir de la cual se miden alturas y profundidades. De igual modo que el CO₂, el vapor de agua tiene las propiedades de un gas invernadero e interactúa intensamente con la biosfera. Si aceptamos la proposición de que la vida controla y adapta activamente el entorno atmosférico según sus necesidades, su relación con el vapor de agua ilustra nuestra conclusión de que las incompatibilidades de los ciclos biológicos y el equilibrio inorgánico son más aparentes que reales.

6. El mar

Como Arthur C. Clarké ha señalado: "Qué inapropiado llamar Tierra a este planeta, cuando es evidente que debería llamarse Océano". Casi tres cuartas partes de la superficie de nuestro mundo son mares; a ello se debe el que, cuando es fotografiado desde el espacio, presente ese maravilloso aspecto de esfera azul zafiro moteada por albos vellones de nubes y tocada del brillante blanco de los campos de hielo polares. La belleza de nuestro hogar contrasta fuertemente con la apagada uniformidad de nuestros inertes vecinos, Marte y Venus, carentes del abundante manto acuático de la Tierra.

Los océanos, esas inmensas extensiones de profundas aguas azules, son mucho más que algo deslumbrantemente bello para quien los contempla desde el espacio. Son piezas maestras en la máquina de vapor planetaria que transforma la energía radiante del Sol en movimientos del aire y el agua, los cuales, a su vez, distribuyen esta energía por todos los rincones del mundo. Los océanos constituyen colectivamente un enorme depósito de gases disueltos de gran importancia a la hora de regular la composición del aire que respiramos; ofrecen, además, morada estable a la vida marina, aproximadamente la mitad de toda la materia viva.

No estamos seguros de cómo se formaron los océanos. Fue hace tan largo tiempo —mucho antes del inicio de la vida— que muy poca información geológica del proceso ha llegado hasta nosotros. Se han formulado multitud de hipótesis sobre la forma de los océanos primigenios; se ha mantenido incluso que, en épocas remotas, los mares cubrían todo el planeta: no existían ni tierras ni aguas someras, aparecidas con posterioridad. Si esta hipótesis se confirmara, habríamos de revisar las concernientes al origen de la vida. Hay sin embargo, todavía, acuerdo general respecto a que el primer paso en la formación de los océanos se dio cuando el recientemente constituido planeta exhaló grandes masas de gases desde su interior; el segundo y definitivo tuvo lugar cuando el planeta se hubo calentado lo suficiente para destilar de ellos la atmósfera y los océanos primordiales.

La historia de la Tierra anterior a la vida no nos ayuda directamente en nuestra búsqueda de Gaia; más interés y relevancia tiene la estabilidad fisicoquímica de los océanos a partir de la aparición de la vida. Hay pruebas de que, durante los últimos tres eones y medio, mientras los continentes se desgarraban y se recomponían, los hielos polares se licuaban y volvían a helarse y el nivel del mar subía y bajaba, el volumen total de agua, a pesar de todas las metamorfosis, permanecía inmutable. La profundidad media actual de los océanos es de 3.200 metros (2 millas aproximadamente), aunque en ciertas fosas se alcanzan los 10.000 metros (unas 6 millas). El volumen total de agua se cifra en torno a los 1,2 miles de millones de kilómetros cúbicos (300 millones de millas cúbicas), estando su peso próximo a los 1,3 millones de megatoneladas.

Estas descomunales cifras han de ser vistas en perspectiva. Aunque el peso de los océanos es 250 veces el de la atmósfera, representa solamente una parte por cuatro mil del peso de la Tierra. En un globo

terráqueo de 30 centímetros de diámetro, la profundidad oceánica media sería poco más que el grosor del papel de este libro y la más profunda de las fosas marinas se convertiría en una incisión de un tercio de milímetro. Suele afirmarse que la oceanografía, el estudio científico del mar, la inició, hace aproximadamente un siglo, el viaje del *Challenger*, navío dedicado a la investigación y desde el cual se llevó a cabo la primera investigación sistemática de todos los océanos del mundo. Su programa de trabajo incluía observaciones sobre física, química y biología marinas. A pesar de este prometedor comienzo multidisciplinar, la oceanografía se ha ido fragmentando progresivamente en subespecialidades separadas (biología marina, oceanografía química, geofísica oceánica y otros híbridos), cuyo número coincide exactamente con el de los especialistas dispuestos a defenderlas como cotos exclusivos. Y, sin embargo, a despecho de todo esto, la oceanografía ha sido una ciencia comparativamente menor. Casi todas sus aportaciones de peso están fechadas después de la segunda guerra mundial; el aguijón, casi siempre, la competencia internacional por las fuentes de alimentos, energía y ventajas estratégicas. Sólo en fecha muy próxima parece reavivarse el espíritu de la expedición del *Challenger* con su concepto del mar como entidad indivisible. La física, la química y la biología de los océanos vuelven a ser consideradas partes interdependientes de un vasto proceso global.

Un punto de partida práctico para nuestra búsqueda de Gaia en los océanos es preguntarnos porqué son saladas sus aguas. La respuesta hasta hace bien poco considerada de rigor (sin duda continúa apareciendo en muchos textos y enciclopedias), solía ser que debido a las pequeñas cantidades de sal que lluvias y ríos arrastraban hasta ellos. Sus capas superficiales, evaporadas, volverían a las tierras en forma de lluvia, pero la sal, una sustancia no volátil, iría acumulándose poco a poco en sus aguas, cuya salinidad aumentaría más y más con el tiempo. Esta respuesta es perfectamente coherente con la explicación tradicional de por qué el contenido de sal de los fluidos corporales de las criaturas vivas — incluyendo los de nuestra propia especie— es inferior al de los océanos; expresado éste en tanto por ciento (el número de partes en peso de sal por cien partes de agua), es aproximadamente del 3,4, mientras que el de nuestra sangre es tan sólo del 0,8 por ciento: cuando empezó la vida los fluidos internos de los organismos marinos estaban en equilibrio con el mar o, dicho de otra forma, la salinidad de su medio interno y la salinidad de su entorno eran idénticas. Pasaron millones de años y la vida, en uno de sus saltos evolutivos, mandó emisarios desde el mar para colonizar la tierra. La salinidad interna de estos organismos, afirma la teoría, quedó por así decir, fosilizada, detenida en el punto que había alcanzado cuando salieron del mar, en tanto que la de éste continuaba aumentando. Aquí residiría, según dicha explicación, la diferencia entre la salinidad de los líquidos orgánicos y la del mar.

De ser acertada, la teoría de la acumulación de la sal nos permitiría calcular la edad de los océanos. No hay dificultad en establecer la cuantía total de la sal que contienen actualmente:

suponiendo que la masa de esta sustancia arrastrada por lluvias y ríos cada año ha permanecido más o menos constante, una sencilla división nos

daría la respuesta. Al mar llegan unas 540 mega-toneladas de sal anualmente; el volumen total de las aguas marinas es de 1,2 miles de millones de km cúbicos; la salinidad media es del 3,4 por ciento. Todo ello nos llevaría a cifrar la edad de los océanos en unos 80 millones de años, cifra en absoluta disconformidad con toda la paleontología. No queda otro remedio, pues, que empezar de nuevo.

Ferren MacIntyre ha señalado recientemente que la sal de los mares no procede exclusivamente de la arrastrada por las aguas continentales; cita un antiguo mito nórdico según el cual el mar es salado porque en el fondo hay un molino de sal girando eternamente. Este mito no andaba demasiado lejos de la verdad: ahora sabemos que, de cuando en cuando, el pastoso magma del interior de la Tierra se abre camino a través del fondo oceánico. Este proceso, parte del mecanismo responsable del desplazamiento de los continentes, significa un aporte adicional de sal. Sumándola a la que las aguas arrastran y repitiendo nuestro cálculo la edad de los océanos pasa a ser de 60 millones de años. El arzobispo Usher, figura destacada de la iglesia protestante irlandesa del siglo XVII, dedujo la edad de la Tierra basándose en la cronología del Antiguo Testamento: según sus cálculos, la Creación había tenido lugar el año 4004 antes de Cristo. Estaba equivocado, pero tomando como referencia la verdadera escala temporal, sus conclusiones no son menos descabelladas que cifrar la edad de los océanos en 60 millones de años.

Parece haber una razonable certeza de que la vida comenzó en el mar; por otra parte, los geólogos han aportado pruebas sobre la existencia de organismos sencillos, bacterias probablemente, hace casi tres eones y medio: ésta sería, al menos, la edad de los océanos. Tal supuesto es congruente con las estimaciones de la edad de la Tierra obtenidas a partir de las medidas de los niveles de radiactividad, según los cuales son unos cuatro eones y medio —4.500 millones de años— el tiempo transcurrido desde su formación. Los datos geológicos indican así mismo que la salinidad de los mares no ha variado gran cosa desde su aparición y la eclosión de la vida en ellos; no lo bastante, en cualquier caso, para explicar la diferencia entre su nivel actual y el de nuestra sangre.

Son éstas las discrepancias que nos obligan a repensar completamente la cuestión de por qué los mares son salados. Estamos aceptablemente seguros de las cantidades de sal aportadas por el "lavado" continental (lluvias y ríos) y por las erupciones a través del suelo oceánico (el "molino de sal"): la salinidad de los mares, sin embargo, no ha aumentado todo lo que cabría esperar de la teoría acumulativa. Parece necesario concluir, por tanto, la existencia de un "filtro" para la sal que la hace desaparecer de los océanos en la misma medida que llega a ellos. Antes de formular nuestras especulaciones sobre la naturaleza de este filtro y sobre el destino de la sal que capta, hemos de considerar ciertos aspectos de la física, la química y la biología marinas.

El agua del mar es una sopa ligera, aunque de muchos ingredientes, compuesta por organismos vivos o muertos y por sustancias inorgánicas disueltas o en suspensión. De entre las disueltas, las más abundantes son sales inorgánicas (en el lenguaje de la química, el término "sal" describe una clase de sustancias de la que el cloruro sódico, la sal común, es sólo

un ejemplo). La composición del agua del mar es diferente según los lugares y, además, varía de una profundidad a otra; aunque en términos de salinidad total las diferencias son pequeñas, tienen suma importancia en la interpretación detallada de los procesos oceánicos. Habida cuenta, sin embargo, de que nuestro propósito actual es discutir los mecanismos generales del control de la sal, podemos considerarlas no significativas.

Una muestra promedio de agua marina contiene el 3,4 por ciento de sales inorgánicas por kilogramo de peso. De esta cantidad, el 90 por ciento aproximadamente es cloruro sódico, si bien tal afirmación no es rigurosamente exacta en términos científicos: cuando las sales inorgánicas están disueltas en agua se hallan escindidas en partículas de tamaño atómico y cargas eléctricas opuestas denominadas iones. El cloruro sódico, por su parte, se fragmenta en un ion sodio, positivo y un ion cloruro, negativo, que se mueven más o menos independientemente entre las moléculas de agua circundantes. Aunque tal comportamiento pueda parecer sorprendente —las cargas eléctricas de signo opuesto se atraen entre sí, permaneciendo por lo general enlazadas en forma de pares iónicos— se debe a que el agua tiene la propiedad de debilitar grandemente las fuerzas eléctricas de atracción entre iones de carga opuesta. Si mezclamos las soluciones acuosas de dos sales distintas (cloruro sódico y sulfato de magnesio por ejemplo) , todo lo que podremos decir respecto de la composición de la solución resultante es que se trata de una mezcla de cuatro iones: sodio, magnesio, cloruro y sulfato. En condiciones adecuadas es más sencillo extraer de la mezcla sulfato de sodio y cloruro de magnesio que recuperar las sales iniciales.

Estrictamente hablando, es por lo tanto incorrecto decir que el agua del mar "contiene" cloruro de sodio: contiene los iones constitutivos del cloruro de sodio. Hay también en ella iones magnesio y sulfato, además de pequeñas cantidades de iones calcio, bicarbonato y fosfato encargados de funciones indispensables en los procesos biológicos marinos.

Uno de los requerimientos menos conocidos de la célula viva es que, salvo raras excepciones, ni su salinidad interna ni la de su entorno pueden exceder por más de algunos segundos un valor del 6 por ciento. Pocas son las criaturas que toleran una tasa de sal superior a ésta (son características de estanques y lagos salobres); tan escasas y excepcionales son como los microorganismos capaces de sobrevivir al agua hirviente. Sus especialísimas adaptaciones se han realizado con permiso del resto del mundo viviente, que les suministra oxígeno y alimento en la forma adecuada y asegura la transferencia de estos artículos de primera necesidad al estanque salobre o al arroyo caliente. Sin tales ayudas, tan extrañas criaturas no podrían sobrevivir a pesar de haberse adaptado espectacularmente a sus casi letales hábitats.

Las quisquillas de los estanques salobres, por ejemplo, poseen un caparazón extraordinariamente recio, tan impermeable al agua como el casco de un submarino; gracias a él pueden mantener una salinidad interna similar a la nuestra —alrededor del 1 por ciento— viviendo en aguas muy saladas. De no ser por su resistente recubrimiento, estas criaturas desaparecerían en cosa de pocos segundos, porque el agua de sus fluidos orgánicos, poco salados, escaparía hacia el agua mucho más

salada del estanque para diluirla; esta tendencia del agua a desplazarse de la solución salina más débil a la más fuerte es un ejemplo de lo que los químicos físicos llaman osmosis. Este proceso tiene lugar siempre que una solución salina —o de cualquier otro tipo— de baja concentración esté separada de otra solución más concentrada por una membrana permeable al agua pero no a la sal. El agua fluye a su través desde la solución débil a la fuerte para que la concentración de ésta disminuya. Si no hay nada que lo impida, el proceso continúa hasta que las dos soluciones quedan equilibradas.

Este flujo puede inhibirse aplicando una fuerza mecánica opuesta a él. La fuerza oponente recibe el nombre de presión osmótica; depende de la naturaleza de la sustancia disuelta y de la diferencia entre las concentraciones de las dos soluciones. La presión osmótica puede llegar a ser considerable. Si el caparazón de la quisquilla mencionada permitiera el paso del agua, la presión que el animal tendría que ejercer para evitar la deshidratación sería, aproximadamente, de 150 kilogramos por centímetro cuadrado (2.300 libras por pulgada cuadrada), presión equivalente a la ejercida por una columna de agua de una milla de alto. Dicho de otra forma: si la quisquilla hubiera de extraer el agua que su organismo necesita del salobre entorno, forzando un flujo de líquido en contra del gradiente de concentración, habría de disponer de un órgano de bombeo con capacidad para subir agua desde un pozo de una milla de profundidad. La presión osmótica es, por consiguiente, consecuencia de una salinidad interna diferente a la externa. Suponiendo que ambas concentraciones están por debajo del nivel crítico del 6 por ciento, la mayoría de los organismos vivos resuelven fácilmente el problema de ingeniería planteado. El nivel absoluto es lo que importa, porque, frente a una salinidad —externa o interna— superior al 6 por ciento, las células se hacen literalmente pedazos.

Los procesos de la vida consisten fundamentalmente en interacciones entre macromoléculas. Habitualmente, la secuencia de acontecimientos está programada hasta el menor detalle: dos macromoléculas empezarían quizá por aproximarse, adoptarían las posiciones adecuadas, permanecerían juntas durante un rato (fase en la que podrían realizarse intercambios de material) y se separarían. Para lograr una colocación adecuada son de gran ayuda las cargas eléctricas situadas en diversos puntos de cada macromolécula. Las zonas cargadas positivamente de una se amalgaman con las áreas cargadas negativamente de la otra. Cuando se trata de sistemas vivientes, estas interacciones tienen invariablemente lugar en un medio acuoso, donde la presencia de iones disueltos modifica la atracción eléctrica natural entre las macromoléculas, haciendo posible que puedan aproximarse y colocarse con la debida facilidad y un alto grado de precisión.

En efecto: las áreas negativas de la macromolécula quedan rodeadas de iones positivos y las áreas positivas de iones negativos. Estos conglomerados iónicos actúan como una suerte de pantalla que neutraliza parcialmente la carga a cuyo alrededor se sitúan, reduciendo subsiguientemente la atracción entre las dos macromoléculas. A mayor concentración de sal, más intenso será el efecto pantalla de los iones y

más débiles resultarán las fuerzas de atracción. Una salinidad demasiado alta perjudicará a las interacciones, y ello a su vez repercutirá sobre las correspondientes funciones celulares. Si, por el contrario, la concentración de sal es excesivamente baja, las fuerzas de atracción entre macromoléculas contiguas podrían llegar a ser irresistibles, la separación no se produciría y las consecuencias serían tan negativas como las del supuesto anterior.

Las fuerzas eléctricas encargadas de mantener la integridad de la capa externa de la membrana celular viva son semejantes a las que acabamos de describir. La membrana tiene, entre otras funciones, la de garantizar que la salinidad del medio intracelular no sobrepase los límites permisibles. Muy poco menos sutil que una pompa de jabón, ofrece una protección comparable a la del casco de un buque frente al agua o a la del fuselaje de un avión respecto a la atmósfera, aunque la estanqueidad celular se logra por medios bien distintos a la proporcionada por el casco de un barco: éste trabaja mecánica y estáticamente, mientras la membrana celular hace uso activo, dinámico, de los procesos bioquímicos.

La delgada película que encapsula toda célula viviente incorpora bombas de iones, capaces de impulsar hacia el exterior los que no convengan y de introducir en la célula los precisos a sus necesidades. Los potenciales eléctricos aseguran a la membrana la flexibilidad y la fortaleza necesarias para llevar a buen fin este cometido. Si la concentración de sal a uno u otro lado de la membrana sobrepasa ese nivel crítico del 6 por ciento, el efecto pantalla de los iones que rodean las cargas eléctricas responsables de la integridad de la membrana se intensifica, el potencial desciende, la debilitada membrana se desintegra y la célula se hace trizas. Salvo para las membranas altamente especializadas de las bacterias halofílicas (amantes de la sal) cuyo habitat está en estanques o lagos salobres, las células de todas las demás criaturas vivientes se hallan sometidas a este límite de salinidad.

Entendemos ahora porqué los organismos vivos, tan profundamente dependientes del correcto funcionamiento de los fenómenos bioeléctricos, pueden sobrevivir tan sólo si la salinidad del medio se mantiene dentro de límites seguros, especialmente en lo tocante al límite superior, al crítico 6 por ciento. A la luz de todo esto, la pregunta ¿por qué es salado el mar? empieza a parecernos menos interesante. El lavado continental y las irrupciones de magma a través del suelo oceánico explican fácilmente el actual nivel de salinidad de los mares. La pregunta ahora obligada es: ¿por qué no es el mar *más* salado? Entreviando a Gaia, yo contestaría: porque desde el comienzo de la vida, la salinidad de los océanos ha estado bajo control biológico. La siguiente pregunta, obviamente, es: ¿cómo? Es éste precisamente el quid de la cuestión, porque necesitamos investigar y reflexionar no sobre cómo llega la sal a los océanos, sino sobre cómo sale de ellos. Estamos nuevamente en nuestro filtro, buscando un proceso de eliminación de sal que, si nuestra creencia en la intervención de Gaia tiene fundamento, habrá de conectar de algún modo con la biología de los mares.

Volvamos a plantear el problema. De que la salinidad del agua marina ha cambiado muy poco en cientos de millones —si no son miles de millones—

de años hay pruebas comparativamente fiables, tanto directas como indirectas. De lo conocido sobre el nivel de salinidad tolerado por los organismos vivientes que han poblado los mares durante tan dilatados períodos, podemos inferir que, en ningún caso, la salinidad ha podido estar por encima del 6 por ciento (el nivel actual es del 3,4 por ciento) y que, alcanzando simplemente el 4 por ciento, la vida marina se hubiera desarrollado a través de criaturas bien distintas a las reveladas por el registro geológico. Y, sin embargo, la cantidad de sal que lluvias y ríos arrastran hacia el mar durante cada 80 millones de años es idéntica a toda la sal actualmente contenida en los océanos. Si este proceso hubiera continuado sin trabas no habría hoy océano que no fuera un Mar Muerto, una masa de agua saturada de sal absolutamente hostil a cualquier forma de vida.

Ha de existir, por consiguiente, un medio para ir eliminando la sal a medida que llega. Los oceanógrafos están seguros de ello desde hace mucho y han intentando descubrirlo en varias ocasiones. Casi todas las teorías se basan esencialmente en mecanismos inorgánicos inertes, aunque ninguna ha obtenido aceptación general. Broecker ha señalado que la remoción de las sales de sodio y magnesio es uno de los grandes misterios no resueltos de la oceanografía química. Son dos, en realidad los problemas a resolver, porque, en un medio acuoso, los iones positivos—sodio y magnesio— están separados de los negativos —cloro y sulfato— y ha de tratarse cada grupo independientemente. Para complicar aún más las cosas, la cantidad de iones sodio y magnesio que el lavado continental aporta a los mares es superior a la de iones cloro y sulfato; el exceso de carga positiva debido a la mayor cantidad de iones sodio y magnesio queda compensado mediante iones aluminio y silicio, cargados negativamente.

Broecker ha sugerido provisionalmente que el sodio y el magnesio son arrastrados a los fondos oceánicos con la lluvia de detritos que incesantemente se precipita sobre ellos, pasando a formar parte del sedimento o combinándose con los minerales del lecho oceánico. Hasta la fecha, por desgracia, se carece de pruebas confirmatorias de cualquiera de las dos posibilidades.

Por lo que respecta a la remoción y destino de los iones cloro y sulfato, negativos, se aduce un mecanismo completamente diferente. Según Broecker, en los brazos de mar aislados —el Golfo Pérsico, por ejemplo—, se evapora mayor cantidad de agua que la ingresada por la lluvia o por los ríos. Si la evaporación se prolonga lo necesario, las sales cristalizan en grandes depósitos, que los procesos geológicos se encargarán eventualmente de cubrir y enterrar. Estos grandes mantos de sal aparecen bajo las plataformas continentales y en algunos casos también en la superficie. La escala temporal de estos procesos —cientos de millones de años— es por tanto congruente con la evolución de la salinidad, salvo en un aspecto vital. Si suponemos que la formación de brazos de mar aislados y los desgarramientos de la corteza terrestre responsables del enterramiento de masas de sal se deben enteramente a procesos inorgánicos, también hemos de aceptar su completa aleatoriedad, tanto espacial como temporal. Podrían explicar el que la salinidad oceánica

media hubiera permanecido dentro de límites tolerados, pero no impedir las fluctuaciones letales, consecuencia de la propia naturaleza aleatoria de los procesos de control.

Parece haber llegado el momento de preguntarnos si la presencia de la materia viviente, tan abundante en los mares, pudo haber modificado el curso de los acontecimientos y colabora todavía en la resolución de tan espinoso problema. Empecemos revisando los posibles componentes vivos del mecanismo capaz de realizar tales gestas ingenieriles a escala planetaria. La mitad, aproximadamente, de la biomasa mundial se encuentra en el mar. La vida terrestre es, en su mayor parte, bidimensional, está anclada a la superficie sólida por la acción de la gravedad. Los organismos marinos y el mar tienen aproximadamente la misma densidad, la vida está libre de las limitaciones de la gravedad y los pastos son tridimensionales. Las primitivas formas de vida que, mediante el proceso conocido como fotosíntesis, producen nutrientes y oxígeno a partir de la luz solar —energizando por consiguiente el océano entero— son organismos de flotación libre, en contraste con los fotosintetizadores terrestres, vegetales anclados al suelo. En los mares no hay árboles ni hacen falta, y no existen los herbívoros triscadores, sino únicamente grandes carnívoros ramoneantes, las ballenas, que se alimentan deglutiendo miríadas de los diminutos crustáceos semejantes a los camarones conocidos colectivamente como *krill*.

La secuencia de la vida marina se abre con los productores primarios, esos incontables millones de plantas unicelulares de flotación libre, esa microflora denominada fitoplancton por los biólogos que constituye el forraje de los animales microscópicos cuyo conjunto configura el zooplancton. Este, por su parte, es sustento de animales mayores y así sucesivamente, hasta llegar a las criaturas de máximo tamaño y rareza. El mar, a diferencia de la tierra, está por lo tanto dominando numéricamente por los diminutos protistas unicelulares, incluyendo algas y protozoos. Medran tan sólo en la capa superficial —hasta una profundidad de 100 metros— iluminada por el sol. Son dignos de mención los cocolitóforos, provistos de conchas de carbonato cálcico que a menudo contienen una gota de aceite (flotador y despensa a la vez) y las diatomeas, algas de esqueleto silíceo. De estos organismos y otros muchos se compone la flora compleja y variada de la denominada zona eufótica.

Merece la pena examinar con cierto detalle el papel de las diatomeas en los océanos. Son, de igual modo que los radiolarios, parientes cercanos suyos, de notable belleza. Sus esqueletos de ópalo configuran una gran variedad de intrincados y siempre exquisitos diseños. El ópalo es una forma especial, semipreciosa, del dióxido de silicio —conocido habitualmente como sílice—, el componente principal de la arena y del cuarzo. El silicio es uno de los elementos más abundantes de la corteza terrestre: la mayoría de las rocas, de la creta al basalto, lo contienen en forma combinada. Generalmente el silicio no es considerado como sustancia de importancia biológica —poco contiene nuestro organismo o lo que comemos— pero es un elemento clave en la vida marina.

Broecker descubrió que menos del 1 por ciento de los minerales con silicio arrastrados al mar por las aguas continentales queda en la superficie

de éste. En lagos salobres, por otra parte, la proporción silicio/sal es mucho más alta que en el mar, tal como cabría esperar de un entorno inerte cuyas condiciones se acercan a las del equilibrio químico. Las diatomeas que asimilan la sílice florecen en los mares pero no, obviamente, en los lagos saturados de sal; sus cortas vidas transcurren en las aguas superficiales. Al morir, se hunden hasta el lecho oceánico, donde se apilan sus esqueletos opalinos, añadiendo a las rocas sedimentarias unos 300 millones de toneladas de sílice al año. El ciclo vital de estos organismos microscópicos da por tanto cuenta de la deficiencia de silicio evidenciada en las capas superficiales del mar, y contribuye a su pronunciada separación del equilibrio químico.

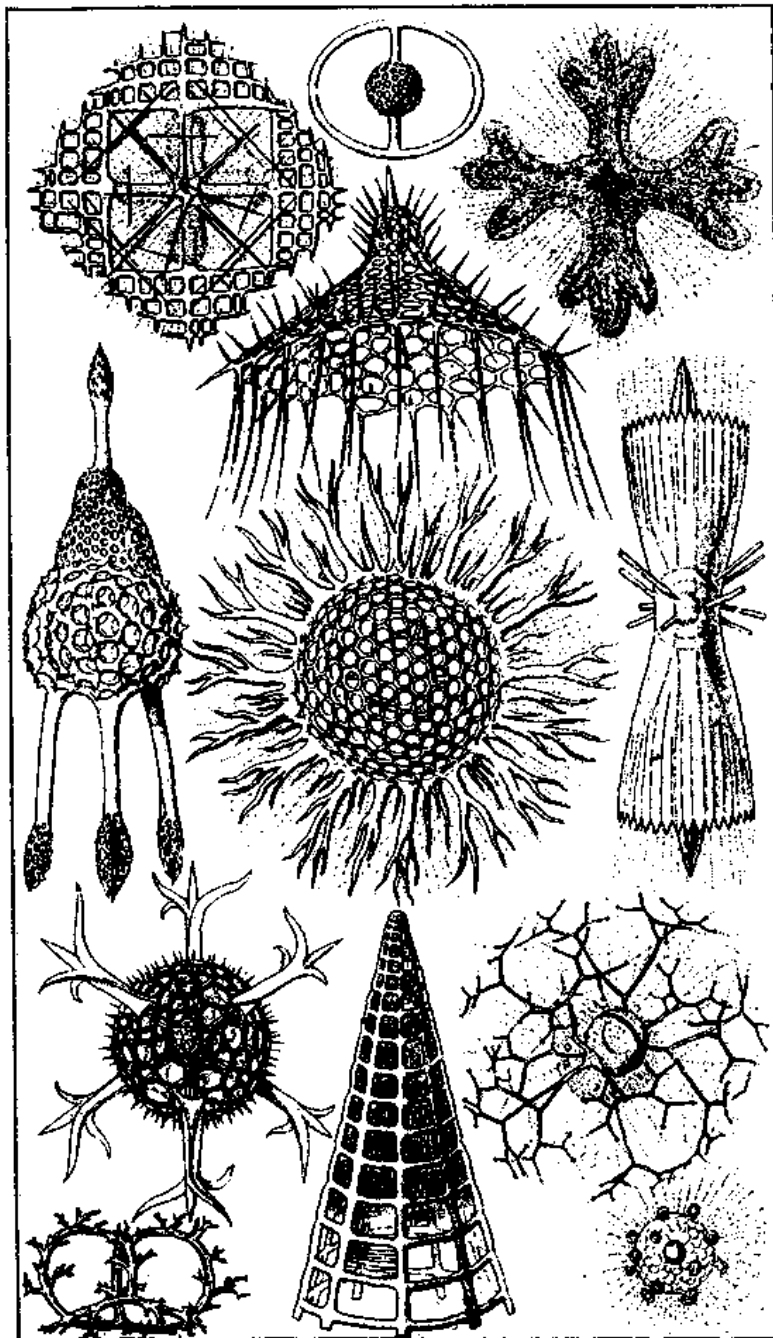


Fig. 7. Radiolarios de las profundidades marinas recogidos por la expedición del *Challenger*. De Haeckel, *History of Creation*, vol. 2.

Estos procesos biológicos de utilización y remoción del silicio pueden considerarse un eficaz mecanismo para controlar su nivel en el mar. Si, por ejemplo, los ríos aportaran mayores cantidades de este mineral, la población de diatomeas se incrementaría (suponiendo que abundaran también sulfates y nitratos), reduciéndose subsiguientemente el nivel de silicio disuelto. Cuando este parámetro descendiera por debajo de lo normal, las diatomeas limitarían su expansión hasta la recuperación del nivel de silicio, fenómeno repetidamente comprobado.

Es ahora el momento de preguntarse si este mecanismo de control del silicio sigue el modelo general de Gaia en lo que respecta al control de los componentes. ¿Es así como interviene la vida para resolver los problemas y dificultades inherentes a las teorías de Broecker sobre un mecanismo de control de la sal puramente inorgánico?

Desde el punto de vista de la ingeniería planetaria, lo importante del ciclo vital de cocolitos y diatomeas es que, cuando mueren, sus partes blandas se disuelven y sus intrincados esqueletos o conchas se hunden hasta el fondo del mar. Los lechos marinos reciben desde hace eones una constante lluvia de estas estructuras, casi tan bellas en la muerte como en la vida, lluvia que ha producido grandes sedimentos de creta y caliza (de los cocolitos) y de silicatos (de las diatómeas). Este diluvio de organismos muertos no es tanto cortejo fúnebre cuanto cinta transportadora construida por Gaia para trasladar sustancias de la zona de producción, situada en niveles superficiales, a las áreas de almacenamiento, emplazadas bajo los mares y los continentes. Parte de la materia orgánica blanda desciende hasta el fondo con los esqueletos inorgánicos, convirtiéndose eventualmente en combustibles fósiles enterrados, minerales sulfurosos e incluso azufre libre. El proceso tiene la ventaja de contar con sistemas de control flexibles basados en la capacidad de respuesta de los organismos vivos a la modificación de su entorno y en su facultad de restaurar (o de adaptarse) las condiciones favorables para su supervivencia. Examinemos, pues, algunos posibles instrumentos utilizados por Gaia para controlar la salinidad. Aunque conjeturas aún, estas ideas me parecen lo bastante sólidas para convertirlas en base de estudios teóricos y experimentales detallados.

Empecemos con una posible forma de acelerar el sistema de cinta transportadora oceánica. Es probable que, si las sales sedimentan, ello sea porque son arrastradas por la lluvia de detritos animales y vegetales (tal como sugería Broecker) del mismo modo que las partículas de polvo flotantes, en la atmósfera son arrastradas al suelo por la lluvia ordinaria. Pudiera haber especies de protistos (u otros organismos marinos de concha dura) particularmente sensibles al nivel de salinidad que murieran tan pronto éste sobrepasara tan siquiera ligeramente la normalidad. Al hundirse sus caparazones, arrastrarían con ellos cierta cantidad de sales, devolviendo la normalidad a las aguas superficiales. Aunque las cantidades de sal eliminadas por este mecanismo son demasiado pequeñas para dar cuenta directamente del filtro o sumidero que buscamos, esta conexión entre la tasa de sedimentación de los caparazones y los niveles de sal podría ser parte de un método para regular la salinidad del mar.

Otra posibilidad muy diferente surge de la explicación dada por Broecker

a la remoción de cloruro y sulfato: sugiere éste que el exceso de sal se acumula en forma de evaporados en bahías de aguas someras, lagos interiores y brazos de mar aislados, donde la tasa de evaporación es rápida y el aporte de agua salada unidireccional. Formulemos la audaz hipótesis de que los lagos salobres son consecuencia de la vida marina: la regulación homeostática podría resolver la incógnita principal de la propuesta de Broecker, cómo resulta tan estable un sistema de remoción de sal aparentemente basado en la formación de evaporados a consecuencia de fuerzas inorgánicas por completo aleatorias.

La construcción de barreras del tamaño necesario para cerrar miles de millas cuadradas de mar en las regiones tropicales puede parecer una obra de ingeniería muy por encima de las posibilidades humanas y sin embargo, los arrecifes coralinos son, con gran diferencia, de dimensiones superiores a las de cualquier estructura humana (todavía mayor era la escala, en épocas remotas, de los arrecifes de estromatolitos). Construidos a escala de Gaia, son murallas cuya altura se cifra en millas, y cuya longitud alcanza los miles de millas, obra de una cooperativa de organismos vivientes. ¿Es posible que la Gran Barrera, frente a la costa nororiental australiana, forme parte de un proyecto inacabado de laguna de evaporación?

Este ejemplo de los resultados de la cooperación durante eones de unas criaturas sumamente sencillas —incluso si carece de significado para la hipótesis Gaia— nos estimula a especular sobre otras posibilidades. Hemos visto ya como los seres vivos han modificado la atmósfera a nivel planetario. ¿Qué pensar de la actividad volcánica, del desplazamiento de los continentes? Ambos son consecuencia de convulsiones interiores, pero ¿está Gaia tras ellos? De ser así, ¿no ofrecerían mecanismos adicionales para la construcción de lagunas, dejando aparte su efecto primario sobre las fracturas de los lechos oceánicos y las transferencias de sedimentos?

Las especulaciones de esta clase no son, en absoluto, tan descabelladas como pudiera parecer a primera vista. Los oceanógrafos sospechan ya que los volcanes submarinos pueden, en ocasiones, ser el resultado final de actividades biológicas, y de una forma bastante directa. Buena parte del sedimento que se precipita sobre el lecho oceánico es sílice casi puro; con el paso del tiempo, su acumulación se hace lo suficientemente importante como para alabear la delgada roca plástica del suelo oceánico, depositándose una cantidad adicional de sedimento en la concavidad resultante. Entretanto, la conducción de calor desde el interior de la Tierra queda impedida por este manto —progresivamente más grueso— de sílice, cuya estructura abierta hace de él un buen aislante térmico, a la manera de una prenda de lana. La temperatura, pues, de la zona situada debajo del depósito silíceo aumenta, la roca subyacente se ablanda más aún, la deformación se acentúa, se deposita más sedimento y la temperatura asciende más y más. Se han establecido, pues, las condiciones de una realimentación positiva. El calor se hace por fin lo suficientemente intenso para fundir la roca del lecho oceánico, lo que produce un vertido de magma al exterior. Así pudieron formarse las islas volcánicas, y quizás, ocasionalmente, también las lagunas. En las aguas de menor profundidad cercanas a las costas sedimentan grandes depósitos de carbonato de calcio, que a veces emergen nuevamente en forma de creta o de caliza.

En otras ocasiones entran en contacto con las rocas calientes de las regiones inferiores, donde actúan como fundente para las rocas, favoreciendo por tanto la aparición de volcanes.

En un mar inerte, el sedimento preciso para desencadenar esta secuencia de acontecimientos nunca se hubiera depositado en el lugar adecuado. Los planetas muertos también poseen volcanes pero, a juzgar por el gran ejemplo marciano —bautizado como Nix Olympus—, no tienen demasiado que ver con sus contrapartidas terrestres. Si Gaia ha modificado el suelo oceánico lo ha hecho explotando una tendencia natural, aprovechándose de ella. No sugiero, evidentemente, que todos los volcanes, ni siquiera la mayoría, sean consecuencia de la actividad biológica, sino la conveniencia de considerar la posibilidad de que la tendencia a las erupciones sea explotada por la biota en favor de sus necesidades colectivas.

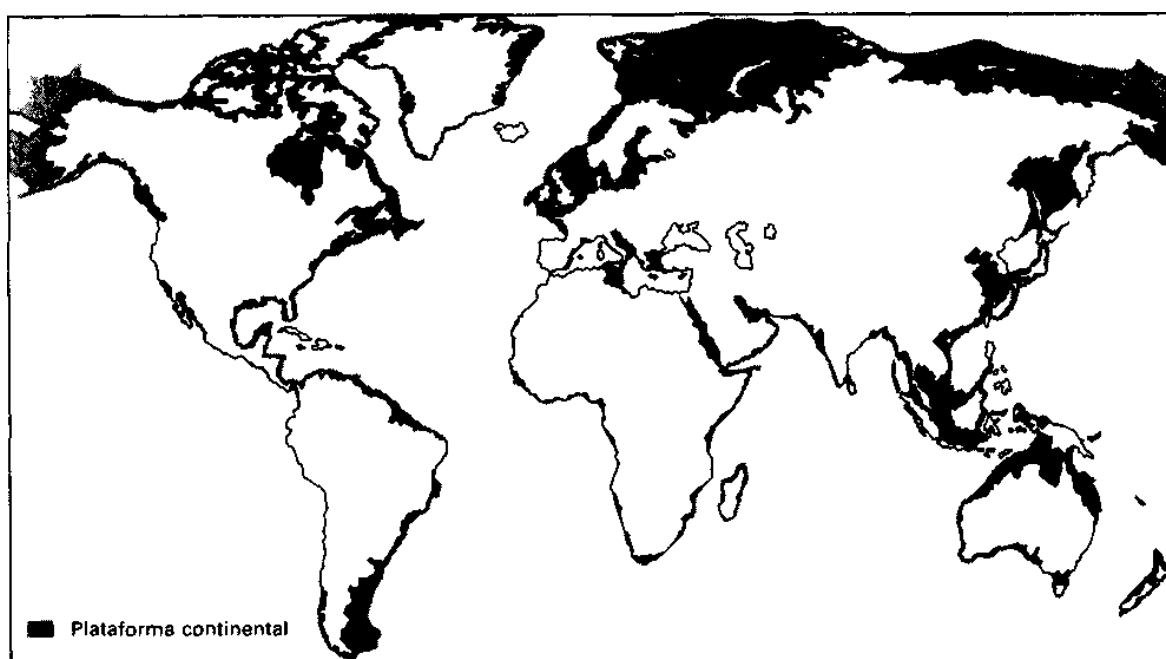


Fig. 8. Plataformas continentales de los océanos. Estas regiones, que ocupan un área de dimensiones similares a las del continente africano, podrían ser claves en la homeostasis de nuestro planeta. Aquí se entierra carbono, lo que mantiene el nivel de oxígeno atmosférico; son, además, fuente de muchos otros componentes gaseosos y volátiles esenciales para la vida.

Si la idea de la manipulación de fenómenos geológicos de grandes proporciones en interés de la biosfera sigue pareciendo ofensiva para el sentido común, merece la pena recordar que ciertos terremotos han sido consecuencia de una alteración en la distribución del peso en una zona determinada provocada por la construcción de una presa. El potencial de perturbación ligado a la masa sedimentaria de un arrecife coralino es infinitamente mayor.

Nuestra discusión de la salinidad y su control es incompleta y muy general. No he dicho prácticamente nada sobre las variaciones en el contenido de sal de un lugar del océano a otro, ni sobre componentes salinos tales como los iones fosfato y nitrato, nutrientes primarios cuyas relaciones son aún un misterio para los oceanógrafos: nada tampoco

sobre los nódulos de manganeso hallados en amplias zonas del lecho marino, cuyo origen es indudablemente biológico, ni sobre las complejidades de las corrientes oceánicas y los sistemas de circulación. Todos son procesos, o partes de procesos, que influyen directa o indirectamente en (o son influidos por) la presencia de la materia viva. He dicho muy poco sobre la cuestión de las relaciones ecológicas entre los organismos pertenecientes a los miles de especies que pueblan los mares, o sobre si la injerencia del modo de vida humano, deliberada o accidental, repercute en la química o la física oceánicas y, subsiguientemente, en nuestro propio bienestar; si, por ejemplo, la carnicería de las ballenas cuyo resultado final pudiera ser la total extinción de estos maravillosos mamíferos podría tener otros efectos de largo alcance además del de privarnos para siempre de su compañía única. Todas estas omisiones se deben en parte a falta de espacio, pero sobre todo a carencia de información sólida sobre la que construir.

Afortunadamente, se están dando al fin los pasos necesarios para llenar las muchas lagunas que ostenta nuestro departamento de información, y no siempre a costa de dispendios a escala de "Gran Ciencia": hace poco tiempo, algunos de nosotros participamos en un modesto proyecto cuyo propósito era el estudio de ciertas actividades de Gaia, importantes también a pesar de ser de una categoría en cierta forma inferior a la de las grandes obras ingenieriles sobre las que hemos especulado en relación con el control de salinidad.

En 1971 realicé un viaje en el *Shackleton* —velero que desplazaba solamente unos cientos de toneladas dedicado a tareas de investigación— desde Gales del Sur a la Antártida. Iba acompañado por dos colegas, Robert Maggs y Roger Wade; la razón principal de nuestra presencia a bordo era llevar a cabo ciertos estudios geológicos. Los tres estábamos en el barco como supernumerarios, libres de utilizarlo como plataforma de observación móvil mientras navegaba hacia el sur y el cumplimiento de su misión. Queríamos estudiar en especial la posibilidad de equilibrar el balance mundial del azufre incluyendo un componente ignorado hasta entonces aunque potencialmente importante, el dimetil sulfuro.

El misterio del desequilibrio del azufre empezó unos años antes, cuando los científicos dedicados al estudio del ciclo del azufre descubrieron que el aporte azufrado de los ríos al mar era superior a lo que la totalidad de las fuentes terrestres conocidas podían producir. Sumando las cantidades derivadas del arrastre climatológico de minerales azufrados, el azufre extraído del suelo por las plantas, y el introducido en la atmósfera como consecuencia del quemado de combustibles fósiles se encontraron con una discrepancia cuya magnitud era de cientos de megatoneladas anuales. E. J. Conway sostenía que el azufre restante era transportado del mar a la tierra vía la atmósfera en forma de sulfuro de hidrógeno, ese maloliente gas responsable del remoquete de "apestosa", con que uno se refería invariablemente a la antigua química escolar. Nosotros, sin embargo, dudábamos de explicación tan simple. Por un lado, nadie había detectado jamás en la atmósfera sulfuro de hidrógeno en cantidad suficiente como para dar cuenta del mencionado desacuerdo y, por otro, esta sustancia reacciona tan rápidamente con el agua marina,

rica en oxígeno —formando productos no volátiles—, que en ningún caso dispondría del tiempo preciso para alcanzar la superficie del agua y menos para escapar a la atmósfera. Mis dos colegas y yo pensábamos que el agente a cuyo cargo estaba el transporte aéreo del azufre restante era el dimetil sulfuro, compuesto químicamente emparentado con el sulfuro de hidrógeno. Si nos inclinábamos por esta hipótesis era, entre otras cosas, porque el oxígeno destruye al dimetil sulfuro mucho más lentamente que al sulfuro de hidrógeno, el candidato rival.

Nos asistían razones sólidas para tomar partido por el dimetil sulfuro. Tras muchos años de experimentación, el profesor Frederick Challenger de la Universidad de Leeds había demostrado que la adición de grupos metilo (proceso conocido como metilación) a determinadas sustancias para transformarlas en gases o vapores era un expediente al que multitud de organismos recurrían con frecuencia a fin de librarse de productos indeseables. Los compuestos metilados de azufre, mercurio, antimonio y arsénico, por ejemplo, son mucho más volátiles que los elementos mismos. Challenger había conseguido demostrar que muchas especies de algas marinas, incluso las más corrientes, producen de este modo grandes cantidades de dimetil sulfuro.

Fuimos tomando muestras de agua marina a todo lo largo del viaje, encontrando en ellas cantidades de dimetil sulfuro en apariencia lo bastante elevadas como para substanciar la hipótesis de su función vehiculante de azufre. Peter Liss nos convencería posteriormente, mediante el cálculo, de que las tasas establecidas en nuestras muestras indicaban que la cantidad de dimetil sulfuro de los mares no bastaba para dar cuenta de la totalidad del azufre echado en falta. Más tarde aún advertimos que el curso seguido por el *Schackleton* no había discurrido por aguas particularmente abundantes en dimetil sulfuro. La principal fuente de esta sustancia no es el mar abierto, que hablando relativamente es un desierto, sino las aguas costeras, ricas en materia viva. Es en ellas donde proliferan algas que, con eficacia asombrosa, extraen el azufre de los iones sulfato presentes en el agua del mar y lo convierten en dimetil sulfuro. Una de estas algas es la *Polysiphonia fastigiata*, un pequeño organismo rojizo habitualmente adherido a los sargazos vejigosos tan corrientes en las zonas mediolitorales. Produce tanto dimetil sulfuro que, si se dejan algunos frondes en una jarra tapada con algo de agua de mar durante una media hora, el aire de su interior se hace casi inflamable. Felizmente, el olor del dimetil sulfuro no tiene nada que ver con el del sulfuro de hidrógeno. En forma diluida es un aroma agradable de reminiscencias marinas. Aunque nuestras conclusiones requieren ulteriores estudios, parece razonable proponer al dimetil sulfuro producido en las zonas marinas adyacentes a las plataformas continentales como el vehículo de azufre buscado. Muchas especies de algas tienen variedad de agua dulce y de agua salada: pues bien, el científico japonés Ishida ha demostrado recientemente que ambas formas de *Polysiphonia fastigiata* son capaces de producir dimetil sulfuro, pero que el eficaz sistema enzimático se activa únicamente en el agua del mar, lo que sugeriría un instrumento biológico destinado a asegurar la producción de dimetil sulfuro en el lugar adecuado desde la perspectiva del ciclo del azufre.

La metilación biológica tiene una parte menos atractiva. Las bacterias cuyo habitat es el fango de los lechos marinos han desarrollado enormemente esta técnica: los elementos tóxicos como el mercurio, el plomo y el arsénico son convertidos a sus formas metiladas volátiles, gases que ascienden a través del agua del mar impregnándolo todo, incluyendo los peces. En circunstancias normales, las cantidades son demasiado pequeñas para ser venenosas, pero hace algunos años, las industrias japonesas situadas en las orillas del Mar del Japón —interior— contaminaron sus aguas con dimetilo de mercurio incrementando su concentración hasta el punto de hacer el pescado venenoso para el hombre. Quienes lo consumieron se vieron afectados, quedando muchos de ellos con invalideces dolorosas. Hubo incluso cierto número de personas que contrajeron Mimamata, denominación local del horroroso cuadro que caracteriza al envenenamiento mercurial. Es una suerte que el proceso natural de la metilación del mercurio no alcance tan dramáticos extremos, aunque no es así con el arsénico. En el siglo pasado, ciertos papeles de pared incluían un pigmento verdoso fabricado con arsénico. En casas húmedas y mohosas, pobremente ventiladas, el moho convertía el arsénico del papel de pared en trimetil arseniato, un gas letal, y los durmientes de los dormitorios con él decorados morían.

El objeto biológico de la metilación de elementos venenosos no se conoce con seguridad, pero quizá sea un medio de eliminar sustancias tóxicas del entorno local acudiendo para ello a su transformación en gases. Al estar diluidos son normalmente inocuos para otras criaturas, pero cuando el hombre altera el equilibrio natural, este beneficioso proceso se maligniza, siendo causa finalmente de invalidez o muerte.

La metilación biológica del azufre sería el modo que tiene Gaia de asegurar un equilibrio adecuado entre el azufre marino y el terrestre. De no ser por este proceso, gran parte del azufre soluble de la superficie terrestre habría sido arrastrado por las aguas continentales mucho tiempo ha sin ser reemplazado, alterándose subsiguientemente las delicadas relaciones entre las sustancias del medio imprescindibles para el bienestar de los organismos vivos.

Los así llamados "halocarbonos" fueron otro grupo de sustancias con grupos metilo en su estructura que nos llamó la atención durante el viaje del *Shackleton*. Derivan estas sustancias de hidrocarburos tales como el metano, en los que uno o más de los átomos de hidrógeno han sido reemplazados por átomos de flúor, cloro, bromo o yodo, elementos denominados genéricamente halógenos por los químicos. Esta línea de trabajo iba a resultar la más científicamente fructífera de nuestro viaje, ofreciendo además un típico ejemplo de lo inadecuada que resulta una planificación excesivamente minuciosa en la tarea de investigación exploratoria básica: lo importante es tener los ojos bien abiertos para no perderse lo que Gaia pueda ofrecernos. Afortunadamente, llevábamos con nosotros un instrumento para medir cantidades vestigiales de halocarbonos gaseosos. Nuestra intención inicial era comprobar si los gases empleados como propelentes de aerosol (de desodorantes, insecticidas, etc.) dejaban un rastro detectable en el aire que permitiera, por ejemplo, observar sus desplazamientos entre el hemisferio norte y el hemisferio sur.

Este estudio tuvo, en ciertos aspectos, hasta demasiado éxito: nos halláramos donde nos halláramos, la detección y medida de los fluorocarbonos no ofrecía ninguna dificultad, descubrimiento que fue causa directa de la preocupación actual, posiblemente exagerada, sobre la capacidad de estas sustancias para deteriorar la capa de ozono. Nuestros aparatos revelaron dos halocarbonos gaseosos más: el tetracloruro de carbono, cuya presencia en el aire es hasta hoy un enigma, y el yoduro de metilo, producido por las algas marinas.

¿Recordáis esas algas con forma de correa que servían para pronosticar el tiempo? Son miembros, utilizando la terminología botánica, de la familia de las laminariáceas. Medran en las aguas someras y tienen la facultad de extraer yodo del mar. Mientras crecen, producen grandes cantidades de yoduro de metilo. Solían ser recolectadas y quemadas, extrayéndose yodo de las cenizas. Es probable que tal como el dimetil sulfuro sirve para vehicular azufre, ese elemento esencial para la vida, el yodo, haga el viaje de vuelta del mar a la tierra por aire en forma de yoduro de metilo. Sin yodo, la glándula tiroides no puede producir las hormonas reguladoras del metabolismo, y sin ellas la mayoría de los animales terminarán por enfermar y morir. Cuando detectamos yoduro de metilo en el aire del mar desconocíamos aún que la mayor parte de este gas reacciona con los iones cloruro del mar para dar cloruro de metilo. A Oliver Zafiriou debemos las primeras indicaciones sobre esta extraña reacción, lo que condujo al descubrimiento del cloruro de metilo como principal vehículo gaseoso de cloro atmosférico. De ordinario habría sido poco más que una curiosidad química pero, como se indicó en el capítulo anterior, el cloruro de metilo es considerado actualmente como el equivalente natural de los propelentes de aerosol en cuanto a capacidad para deteriorar la capa de ozono de la estratosfera. Podría tener una función reguladora de su densidad: ya hemos dicho que demasiado ozono es algo tan peligroso como la falta de él. Otro elemento más por tanto, el cloro metilado marino, que podría desempeñar una función gaiana.

No sería raro, pues, que otros elementos de importancia para la vida, como el selenio, pasaran del mar a la atmósfera en forma de derivados metilados, pero hasta ahora no hemos sido capaces de descubrir la fuente marina de compuesto volátil que vehicule el fósforo, ese elemento clave. Es posible que las necesidades de fósforo sean lo bastante pequeñas como para que el desgaste climatológico de las rocas baste para satisfacerlas, pero si esto no fuera así, valdría la pena interrogarse sobre la posibilidad de que los desplazamientos migratorios de aves y peces cumplan además una función propia de Gaia: el reciclado del fósforo. Contemplados a través de este prisma, los esfuerzos de salmones y anguilas, agotadores y aparentemente perversos, por alcanzar lugares del interior de las masas de tierra muy alejados del mar, cobrarían un sentido nuevo.

La recogida de información sobre el mar, de datos relativos a su química, su física, su biología y a las relaciones entre ellas, debería ocupar, por derecho propio, el primer puesto en la lista de tareas prioritarias para la humanidad. Cuanto más sepamos sobre ello, mejor entenderemos hasta dónde es seguro llegar en el aprovechamiento de los recursos del mar y más completa será nuestra visión de las consecuencias

que tendría abusar de los poderes derivados del carácter dominante de nuestra especie, entrando despiadadamente a saco en sus regiones más fértiles. Menos de una tercera parte de nuestro planeta es tierra firme: ello quizá sea la explicación de que la biosfera haya podido enfrentarse a los radicales cambios introducidos por la agricultura y la ganadería y probablemente sea capaz de seguir haciéndolo a pesar del crecimiento demográfico y la intensificación de los cultivos, pero no creamos que nos está permitido explotar el mar, en especial las regiones cultivables de las plataformas continentales, con impunidad semejante. Nadie sabe realmente los riesgos concomitantes a la perturbación de esta área clave de la biosfera. Es esto lo que me hace pensar que nuestro viaje mejor, más fructífero, habrá de realizarse poniendo la vista en Gaia, recordando durante toda la travesía y en todas nuestras exploraciones que el mar es una de sus partes vitales.

7. Gaia y el hombre: El problema de la contaminación

Casi todos nosotros hemos oído más de una vez de labios de nuestros ancianos tribales que todo iba mejor en los buenos tiempos pasados. Tan profundamente se hunden las raíces de este tópico —nosotros lo transmitiremos a su vez cuando alcancemos la edad madura— que resulta casi automático suponer la existencia de una total armonía entre la humanidad primitiva y el resto de Gaia. Quizá fuimos realmente expulsados del Paraíso y el ritual es repetido de forma simbólica en la mente de cada generación.

La doctrina bíblica sobre la caída, paradigma del paso de un estado de inocencia beatífica al penoso mundo de la carne y el mal a causa de un pecado de desobediencia, resulta difícil de aceptar en nuestra cultura contemporánea. Hoy está más de moda atribuir nuestra pérdida de la gracia a la insaciable curiosidad del hombre, a su irresistible deseo de experimentar alterando el orden natural de las cosas. Resulta significativo que tanto la narración bíblica cuanto —en menor medida, eso sí— su contrapartida moderna parezcan creadas para inculcar y mantener el sentimiento de culpa, poderoso pero arbitrario sistema de realimentación negativa en la sociedad humana.

Respecto al hombre moderno, lo primero en lo que quizá se piense cuando se trata de substanciar la creencia de su condenación inexorable sea en la contaminación de la atmósfera y de las aguas, cuyo aumento es constante desde la época de la Revolución Industrial, iniciada en Gran Bretaña a finales del siglo XVIII, para extenderse después con la rapidez de una mancha de aceite por casi todo el hemisferio norte. Suele haber en nuestros días acuerdo general sobre que la actividad industrial está mancillando la cuna de la humanidad ¡representa una amenaza para el conjunto de la biosfera cuyo carácter es más ominoso cada año. En este punto, sin embargo, disiento del pensamiento convencional. Es posible que, en última instancia, nuestro frenético desarrollo tecnológico se pruebe doloso o destructivo para nuestra especie, pero las pruebas aportadas para demostrar que la actividad industrial, ya sea en su nivel de hoy o en el de un futuro inmediato, puede poner en peligro al conjunto de la vida de Gaia, son verdaderamente muy endebles.

Suele olvidarse con demasiada facilidad que la Naturaleza, además de ser roja de dientes y garras, no duda en acudir a la guerra química si fracasa el armamento convencional. ¿Cuántos de nosotros sabemos que el insecticida pulverizado en casa para librarnos de moscas y avispas es un producto del crisantemo? El pelitre es todavía una de las sustancias más eficaces para matar insectos.

Si de letalidad se trata, los venenos que la poseen en mayor grado son, con gran diferencia, compuestos naturales. Entre ellos se cuentan la toxina botulínica, producida por una bacteria, la mortífera secreción de los dinoflagelados causantes de las mareas rojas o el polipéptido fabricado por la amanita, todos productos enteramente biológicos, que de no ser por su

toxicidad, podrían figurar con todos los honores en las estanterías de un establecimiento especializado en salutíferos alimentos "orgánicos". Hay plantas, como la *Dichapetalum toxicarium* africana y las especies emparentadas con ella, que han aprendido un par de cosas sobre la química del flúor: incorporan este potente elemento a sustancias naturales tales como el ácido acético y llenan sus hojas de la sal resultante. Ciertos bioquímicos se han referido a este compuesto hablando de una llave inglesa metabólica, esclarecedora alusión a los destrozos causados cuando penetra en los ciclos químicos, delicadamente engranados, de casi cualquier otro organismo viviente. Si se tratara de un compuesto de manufactura industrial, sería citado como un ejemplo más del uso perverso y maligno que hace el hombre de la tecnología química para asestar golpes bajos y reforzar su posición en la biosfera, pero es, sin embargo, un producto natural, y solamente uno de entre los compuestos de alta toxicidad orgánicamente fabricados que permiten jugar sucio a sus poseedores; no hay convención de Ginebra para limitar los trucos poco limpios utilizados en la naturaleza. Uno de los mohos de la familia *Aspergillus* ha descubierto cómo fabricar una sustancia llamada aflatoxina que es mutagénica, carcinogénica y teratogénica; dicho con otras palabras, es causa de mutaciones, tumores y malformaciones fetales. Se la sabe origen de grandes sufrimientos como causa de cánceres gástricos, provocados por la ingesta de cacahuets contaminados con este agresivo producto químico natural.

¿Podría ser natural la contaminación? Si por contaminación entendemos el vertido masivo de sustancias de desecho, hay verdaderamente pruebas sólidas de que la contaminación es tan natural para Gaia como para nosotros y casi todos los demás animales es respirar. Ya he mencionado el mayor desastre ecológico padecido por nuestro planeta: la aparición en la atmósfera de oxígeno libre gaseoso hace aproximadamente un eón y medio. La totalidad de la superficie terrestre expuesta al aire o a las mareas devino entonces letal para un dilatado conjunto de microorganismos anaerobios (es decir, cuyo crecimiento es únicamente posible en ausencia de oxígeno) que, como consecuencia de ello, se vieron relegados a una existencia subterránea en los fangos de los fondos fluviales, lacustres y oceánicos. Muchos millones de años después las condiciones que los habían erradicado de la superficie empezaron a transformarse poco a poco, y hoy han regresado de su destierro ocupando el más seguro y cómodo de los ambientes: el tubo digestivo de los animales, desde los mosquitos a los elefantes, donde llevan una existencia regalada, rodeados de alimentos, y gozan de óptimo status. Mi colega Lynn Margulis opina que representan uno de los aspectos más importantes de Gaia y bien podría ser que los grandes mamíferos, especie humana incluida, sirvieran sobre todo para proporcionarles un entorno anaerobio. El que este asunto —la destrucción generalizada de los anaerobios— tuviera un final feliz, no mengua las dimensiones de la catástrofe provocada por la contaminación oxigénica en el momento de producirse. Para ilustrar el efecto del envenenamiento por oxígeno sobre la vida anaerobia, ya he puesto el ejemplo de un alga marina capaz de generar cloro mediante fotosíntesis que lograba apoderarse completamente de los

océanos.

El desastre natural de la contaminación por oxígeno ocurrió con la lentitud suficiente para permitir la adaptación de los ecosistemas de la época —si bien con el sacrificio de numerosas especies— hasta que una nueva biosfera, compuesta por organismos resistentes al oxígeno, heredó la superficie de la Tierra.

La conmoción ambiental, comparativamente menor, provocada por la Revolución Industrial, ejemplifica cómo pueden producirse tales adaptaciones. Es típico el caso de la geómetra menor del abedul, polilla que tan sólo en el transcurso de algunas décadas modificó la pigmentación de sus alas, pasando de gris pálido a casi negro: el producto de este oscurecimiento era mantener la eficacia de su camuflaje contra los depredadores cuando se posaban sobre las cortezas cubiertas de hollín de los árboles crecidos en las zonas industriales de Inglaterra. Hoy, cuando a consecuencia del Decreto sobre la Limpieza del Aire, el hollín ha desaparecido de la atmósfera, el camuflaje de estas criaturas está volviendo rápidamente al gris original. Las rosas, sin embargo, aún se dan mejor en Londres que en remotas áreas rurales cuya atmósfera carece de dióxido sulfuroso, contaminante del aire urbano y destructor de unos hongos parásitos de las citadas flores.

El concepto mismo de contaminación es antropocéntrico; quizá sea incluso irrelevante en el contexto de Gaia. Muchos de los así llamados "contaminantes" están presentes en la naturaleza, lo que hace sumamente difícil determinar cuál es el nivel necesario para justificar el apelativo de "contaminante". El monóxido de carbono, por ejemplo, venenoso para la mayor parte de los mamíferos superiores (incluyendo al hombre) es un producto de la combustión incompleta, un compuesto tóxico exhalado por los motores de combustión interna, las estufas alimentadas con carbón y los fumadores; podría pensarse, por tanto, que el monóxido de carbono contamina un aire de otra forma impoluto a resultas de la presencia de nuestra especie y, sin embargo, analizando el aire aparece monóxido de carbono en todas partes. Deriva de la oxidación del metano atmosférico, fuente que produce cantidades del orden de los 1.000 millones de toneladas cada año. Se trata, por consiguiente, de una sustancia natural, procedente de los vegetales indirectamente; llena también las vejigas natatorias de muchas criaturas marinas. Los sifonóforos, por ejemplo, están repletos de este gas a concentraciones tales que acabarían con nosotros en un dos por tres de alcanzar niveles equivalentes en la atmósfera.

Prácticamente todos los contaminantes, ya pensemos en compuesto de azufre o de mercurio, en halocarbonos, en sustancias mutagénicas y carcinogénicas o en materiales radiactivos tienen, en mayor o en menor medida, un trasfondo natural, cuando no son producidos tan abundantemente en la naturaleza como para ser venenosos desde el principio. Vivir en cuevas excavadas en roca rica en mineral de uranio sería insano para cualquier criatura viva, pero tales cuevas son lo bastante escasas como para no amenazar la supervivencia de ninguna especie. Parece legítimo pensar que la humana es capaz de soportar sin perecer una exposición normal a los numerosos riesgos de nuestro entorno: si, por cualquier causa, uno o más de estos riesgos aumentara, aparecerían adaptaciones tanto individuales como de especie. La respuesta defensiva

normal de un individuo al incremento de la luz ultravioleta es el bronceado de la piel, adaptación que con el transcurso de algunas generaciones se hace permanente. Los pecosos, los de pieles delicadas, no lo pasan demasiado bien cuando se exponen al rigor del sol tropical, pero la especie sufrirá, únicamente, si los tabúes raciales impiden que las futuras generaciones tengan libre acceso a los genes que otorgan una pigmentación oscura.

Una especie puede autoexterminarse cuando a consecuencia de un accidente de química genética produce inadvertidamente alguna sustancia venenosa. Cuando tal veneno es, sin embargo, más letal para sus competidores que para ella misma, puede arreglárselas para sobrevivir y, eventualmente, con el transcurso de la selección darwiniana, intensificar, por un lado, la toxicidad del contaminante en cuestión para sus competidores y adaptarse a él con pleno éxito, por otro.

Examinemos ahora la contaminación contemporánea desde el punto de vista de Gaia, no del de la especie humana. En lo tocante a la contaminación industrial, las zonas más intensamente afectadas son, con diferencia, las áreas urbanas muy pobladas de las zonas templadas del hemisferio norte: prácticamente todo el Japón y determinadas áreas de los Estados Unidos, la Europa Occidental y la Unión Soviética. Muchos de nosotros hemos tenido la oportunidad de contemplarlas por la noche desde un aeroplano en vuelo. Suponiendo que haya viento suficiente para dispersar el smog y la superficie sea visible, la vista habitual es una alfombra verde ligeramente salpicada de gris. En ella destacan claramente los complejos industriales, junto a los que aparecen las apretadas viviendas de los obreros, pero sin embargo la impresión general es que, por doquiera, la vegetación aguarda el momento propicio para volver por sus fueros y apoderarse de todo nuevamente. Algunos de nosotros recordamos la rápida invasión floral que cubría las áreas urbanas despejadas por las bombas en la Segunda Guerra Mundial. Las regiones industriales, vistas desde lo alto, pocas veces son los estériles desiertos que los catastrofistas profesionales nos han enseñado a esperar. Si esto es así para las áreas más populosas y contaminadas de nuestro planeta, no parece que las actividades humanas sean motivo de muy urgente preocupación, aunque por desgracia esto no es necesariamente cierto: se trata tan sólo de buscar los trastornos en los lugares incorrectos.

Las personas influyentes, los moldeadores de opinión y los legisladores de todas las sociedades suelen vivir en ciudades o al menos trabajar en ellas, por lo que sus desplazamientos discurren a través de la red de carreteras y ferrocarriles que interconectan los núcleos del desarrollo urbano e industrial. Sus viajes diarios los hacen depresivamente conscientes de la contaminación ciudadana, de entornos locales escasamente agradables de atravesar o de contemplar desde un atasco de tráfico. Las vacaciones en regiones menos desarrolladas junto al mar o entre montañas confirman, por contraste, la creencia de que el área donde viven o trabajan resulta inadecuada para la vida, fortaleciendo además su determinación de hacer algo al respecto.

Este es pues el origen de la impresión, comprensible pero errónea, de que los mayores atentados ecológicos se han cometido en las regiones

urbanizadas de las zonas templadas del hemisferio norte. La contemplación área del desierto Harappan paquistaní, de muchas zonas de África o, no demasiado tiempo ha, de las áreas centromeridionales de los Estados Unidos —el escenario de *Las uvas de la ira*, la novela de Steinbeck— habría aportado un cuadro más revelador y auténtico de lo que significa la devastación de ecosistemas tanto naturales como humanos. Es en estas regiones profundamente alteradas, en estas enormes extensiones de terreno pelado por la erosión, donde el hombre y sus rebaños han disminuido más intensamente el potencial de vida.

No fue el empleo demasiado entusiasta de tecnología avanzada la causa de estos desastres sino, bien al contrario, como es hoy generalmente admitido, fueron el triste fruto de una agricultura deficiente y una cría de ganado abusiva, apoyado todo ello en una tecnología primitiva.

Resulta instructivo comparar estas vastas extensiones de terreno muerto con la campiña contemporánea inglesa. Su productividad agrícola, grandemente impulsada por los recursos industriales, ha crecido en tal medida que Gran Bretaña produce hoy más alimentos de los necesarios para mantener vivos a sus habitantes, a pesar de una densidad de población de las más altas del mundo, unas mil personas por milla cuadrada. Quedan incluso espacios libres para jardines, parques, bosques, páramos, setos, bosquecillos, para no decir nada de núcleos urbanos, carreteras e industria. Verdad es que, en su entusiasmo ante el aumento de la productividad y de los beneficios, el granjero se ha mostrado proclive a utilizar su maquinaria industrial más como un carnicero que como un cirujano, y que aún se muestra tendente a considerar a los organismos distintos de su ganado y sus cultivos como plagas, hierbajos o alimañas. Podríamos estar viviendo hoy una fase transitoria que desembocara en otro período de maravillosa armonía entre el hombre y su entorno, un período con reminiscencias de lo que fue la paradisíaca campiña del sur de Inglaterra no hace tanto tiempo. A buen seguro que los sociólogos y los lectores de Hardy señalarán la infeliz suerte de los braceros y de los animales, así como las crueldades a las que despreocupadamente eran sometidos unos y otros, pero los temas primarios de este libro no son la gente, los rebaños o los animales domésticos, sino la biosfera y la magia de la Madre Tierra. Queda aún en Wessex lo bastante de este bucólico paisaje para probar que todavía es posible algún tipo de armonía y para alimentar la esperanza de que con el progreso de la tecnología pueda incluso extenderse. Y por lo tocante al hombre del campo, señalar que ha sufrido las crueles tiranías del pasado para alcanzar las dudosas satisfacciones de un mayor estatus y el aburrimiento ruidoso y maloliente de la agricultura mecanizada.

¿Cuáles son, entonces, las actividades humanas que suponen una amenaza para la Tierra y para la vida que en ella mora? La especie humana, con la ayuda de las industrias a su mando, ha causado perturbaciones importantes en algunos de los ciclos químicos fundamentales de nuestro planeta. Somos causantes de un incremento del 20 por ciento en el ciclo del carbono, del 50 por ciento en el del nitrógeno y de más del 100 por cien en el del azufre. Según aumente la población mundial y nuestro consumo de combustibles fósiles haga lo mismo, estas perturbaciones, evidentemente, crecerán todavía más. ¿Cuáles son las

consecuencias más probables? Lo único que hasta ahora ha sucedido es un aumento del 10 por ciento en el dióxido carbónico de la atmósfera, y un incremento —esto, sin embargo, es discutible— de las brumas atribuibles a partículas de sulfates y polvo del suelo.

Se ha vaticinado que el aumento de dióxido carbónico significaría una subida de la temperatura. Se ha afirmado también que la mayor brumosa atmosférica podría ser causa de una cierta pérdida de temperatura, llegando incluso a sugerirse la anulación recíproca de ambos efectos; tal sería el motivo de que las perturbaciones generadas por el quemado de combustibles fósiles no hubieran tenido a su vez ninguna repercusión notable. Si las proyecciones formuladas sobre el crecimiento demográfico se cumplen y si el consumo de los citados combustibles se dobla aproximadamente cada diez años, habremos de estar alerta.

Las partes de la Tierra responsables del control planetario quizá sean las portadoras de nutridas hordas de microorganismos. Las algas de los mares y del suelo se sirven de la luz solar para llevar a cabo la tarea esencial de la química de la vida, la fotosíntesis. Aún generan, en cooperación con las bacterias aerobias del suelo y de los lechos marinos y junto a la microflora anaerobia que puebla las grandes áreas fangosas de las plataformas continentales, los fondos marinos, las ciénagas y los terrenos anegados, aún generan, decimos, más de la mitad del suministro de carbono. Los animales grandes, las plantas y las algas pueden tener importantes funciones especializadas, pero el peso principal de la actividad autorreguladora de Gaia recae sobre los microorganismos.

Como veremos en el próximo capítulo, quizá haya áreas mundiales más importantes para Gaia que otras; por urgente que sea, pues, incrementar la producción mundial de alimentos para satisfacer las necesidades de una población en crecimiento incesante, deberemos tener especial cuidado en no alterar demasiado drásticamente las regiones donde pudiera residir el control planetario. Las plataformas continentales y las tierras pantanosas cuentan generalmente con características y propiedades que las convierten en excelentes candidatas para este papel. Quizá podamos crear desiertos y terrenos yermos con relativa impunidad, pero si devastamos las plataformas continentales explotándolas irresponsablemente, estaremos corriendo un grave riesgo.

Entre las pocas predicciones firmes formuladas sobre el futuro del hombre se cuenta el que la especie duplicará el número de sus miembros en algunas décadas más. El problema de alimentar una población mundial de 8.000 millones de personas sin dañar seriamente a Gaia parece más urgente que el de la contaminación industrial. Aunque se esté de acuerdo con la afirmación anterior podría decirse, sí, pero ¿qué sucede con los venenos más sutiles? ¿No son los herbicidas y los pesticidas la mayor amenaza, para no decir nada de los compuestos que deterioran la capa de ozono?

Debemos mucho a Rachel Carson por habernos advertido de modo tan conmovedor sobre la amenaza que para la biosfera supone el empleo descuidado y excesivo de pesticidas, aunque tiende por regla general, a olvidarse de que sí se toman precauciones. La primavera silenciosa que no alegre el canto de un solo pájaro aún no ha llegado, pero muchas aves,

particularmente las rapaces más raras, se hallan cercanas a la extinción. El cuidadoso estudio realizado por George Woodwell sobre la distribución y el destino del DDT utilizado en todo el planeta es un modelo perfecto de cómo deben manejarse la farmacología y la toxicología de Gaia. La acumulación de DDT no era tan grande como se pensaba y la recuperación de sus efectos tóxicos más rápido de lo supuesto. Parece haber procesos naturales encargados de su remoción no previstos cuando la investigación comenzaba. El período de máxima concentración de DDT en la biosfera ha quedado ahora bien atrás. Es indudable que, en el futuro, seguirá siendo utilizado para combatir las enfermedades transmitidas por insectos, pero se empleará más cuidadosa y más económicamente. Tales sustancias son como medicinas, beneficiosas en dosis apropiadas pero dañinas o incluso letales cuando se administran en exceso. Del fuego, la primera de las armas tecnológicas, se decía que era un buen criado pero un mal amo. Lo mismo sucede con las contribuciones más recientes al arsenal de la tecnología.

Es muy posible que el intenso impulso emocional de los ecologistas radicales nos haga falta para permanecer alerta ante los riesgos reales o potenciales de la contaminación, pero hemos de tener cuidado en no responder hiperreactivamente. En apoyo de la campaña realizada en los Estados Unidos para lograr la prohibición de todos los aerosoles se han visto titulares como éstos: "El aerosol de la muerte amenaza a todos los norteamericanos". Bajo el titular se afirmaba textualmente "Estos ""inofensivos"" aerosoles pueden destruir toda la vida sobre la Tierra". Tan descabelladas exageraciones pueden ser buena política, pero son mala ciencia. Cuando vaciemos el balde debemos procurar no tirar al niño con el agua sucia; en realidad, como los ecologistas se apresurarían a indicarnos, ni siquiera es aceptable ya desprendernos del agua del baño. Hemos de reciclarla.

¿Y qué ocurre con la catástrofe planetaria consecuencia de la contaminación actualmente más de moda, el deterioro irreversible del débil escudo que nos protege contra las mortíferas radiaciones ultravioletas solares? Somos deudores de Paul Crutzen y Sherry Rowland por habernos advertido de la amenaza potencial que para la capa de ozono representan los óxidos de nitrógeno y los clorofluorocarbonos.

En el momento de escribir estas líneas, el ozono estratosférico continúa incrementando su densidad, irregular pero obstinadamente, como si no supiera que debería estar haciendo lo contrario. Y sin embargo, las razones aducidas para justificar su eventual destrucción por los contaminantes resultan tan razonables y convincentes que tanto los legisladores como los científicos especializados en el estudio de la atmósfera se sienten preocupados o inseguros sobre la actitud más conveniente ante posibilidad tan tremenda. La experiencia de Gaia puede indicarnos cuál es el camino a seguir. Si los cálculos de los científicos son correctos, muchos sucesos del pasado habrían deteriorado sensiblemente la capa de ozono. Por ejemplo, una erupción volcánica como la del Krakatoa en 1895 lanzó a la estratosfera cantidades enormes de compuestos de cloro que pudieron haber supuesto la destrucción de hasta el 30 por ciento de la capa de ozono, cifra doble al menos, del daño que los fluorocarbonos podrían

haber causado en el año 2010 si siguen siendo introducidos en la atmósfera al ritmo de hoy. Otras posibilidades son tormentas solares gigantescas, choques con meteoritos grandes, inversiones de los campos magnéticos terrestres, la conversión a supernova de alguna estrella cercana e incluso la sobreproducción patológica de óxido nitroso en el suelo y en los mares. Alguno de estos incidentes —o todos— han debido ocurrir en el pasado con relativa frecuencia, introduciendo en la estratosfera grandes cantidades de los óxidos de nitrógeno a los que se achaca la destrucción del ozono. La supervivencia de nuestra especie y la rica variedad de la vida en Gaia parece prueba concluyente de que o el deterioro de la capa de ozono no es tan letal como a menudo se pretende o que las teóricas agresiones citadas nunca tuvieron efecto. Y más aún: durante los primeros 2.000 millones de años transcurridos desde la aparición de la vida en la Tierra, todos los seres vivos de la superficie, las bacterias y las algas verde azules estuvieron expuestas, sin protección alguna, a la totalidad de la radiación ultravioleta procedente del Sol.

Así pues, aunque no debemos ignorar las advertencias de quienes derivan terribles consecuencias del uso indiscriminado de ciertos productos (desde aerosoles a refrigeradores, que contienen fluorocarbonos), tampoco hay que dejarse llevar por el pánico (como les sucedió a las agencias federales estadounidenses) y promulgar leyes prematuras e injustificadas prohibiendo el uso de productos por otra parte valiosos e inofensivos. Hasta para las predicciones más negras la desaparición del ozono en un proceso lento. Se cuenta, por consiguiente, con tiempo sobrado y la mejor disposición por parte de los científicos para investigar cuanto sea necesario a fin de descartar o confirmar las alegaciones citadas, dejando luego a los legisladores la tarea de decidir racionalmente lo que debe hacerse.

Debemos igualmente dejar de preocuparnos acerca de las grandes cantidades de óxido nitroso y cloruro de metilo —compuestos frecuentemente acusados de tener una acción destructora potente sobre el ozono— que llegan a la atmósfera desde fuentes biológicas, porque hoy se piensa que esta acción destructora no pasa del 15 por ciento (dicho de otra forma, la capa sería un 15 por ciento más gruesa si desaparecieran) y, como ya hemos dicho, demasiado ozono es tan perjudicial como demasiado poco: la producción de óxido nitroso y cloruro de metilo podría formar parte de un sistema regulatorio gaiano.

Tenemos hoy bien presentes los posibles peligros de contaminación global que amenazan a la atmósfera y los océanos. Las agencias nacionales e internacionales están dando los pasos necesarios para establecer centros de monitorización equipados con sensores encargados de mantenernos permanentemente informados sobre la salud de nuestro planeta. Hay satélites en órbita alrededor de la Tierra provistos de instrumentos para monitorizar la atmósfera, los océanos y las masas de tierra firme. En tanto mantengamos un elevado nivel de tecnología este programa de observación continuará, pudiendo incluso ampliarse. Si la tecnología fracasa, habrán fracasado también otros sectores de la industria y los efectos potencialmente dañinos de la contaminación industrial descenderán concomitantemente. Es posible, por último, el logro de una

tecnología sensata y económica que nos permita vivir más en armonía con el resto de Gaia. Creo que si somos capaces de esto último, será conservando y modificando la tecnología, no mediante una reaccionaria campaña de "vuelta a la naturaleza". Un alto nivel tecnológico no tiene por qué ser siempre dependiente de la energía. Piénsese en la bicicleta, el planeador, el velero moderno o en un minicomputador, capaz, en algunos minutos, de realizar cálculos que llevarían años de efectuarse sin su auxilio, y ello consumiendo menos electricidad que una bombilla.

Nuestra zozobra sobre el futuro del planeta y las consecuencias de la contaminación proviene fundamentalmente de nuestra ignorancia sobre los sistemas de control planetario. Si Gaia existe, existen entonces asociaciones de especies que cooperan para llevar a cabo ciertas funciones reguladoras esenciales. Todos los mamíferos y la mayoría de los vertebrados tienen glándula tiroides: ella es la encargada de captar las escasísimas cantidades de yodo que circulan con la sangre, utilizado como ingrediente esencial en la síntesis de unas hormonas que regulan nuestro metabolismo y sin las cuales no podríamos vivir. Como se indicó en el capítulo 6, ciertas algas marinas desempeñarían una función similar pero a escala planetaria. Estas largas cintas vegetales, cuyo hábitat, en las aguas costeras, está permanentemente cubierto por el mar, concentran el yodo disuelto en el agua y sintetizan a partir de él un curioso grupo de sustancias yodadas. Algunas de ellas, volátiles, pasan del océano a la atmósfera. Destaca en este grupo el yoduro de metilo, compuesto que en estado puro es un líquido volátil cuyo punto de ebullición se sitúa en los 42°C. Es muy venenoso y, casi con toda seguridad, mutagénico y cancerígeno. Si fuera un producto de origen industrial, el estricto cumplimiento de la legislación estadounidense podría hacer que los baños de mar fueran prohibidos. La concentración de yoduro de metilo en agua y aire costeros pueden medirse fácilmente con el equipo extremadamente sensible que ahora poseemos, y la ley estadounidense establece la no exposición a sustancias que contengan niveles detectables de un elemento cancerígeno. ¡No temáis! Los niveles actuales de yoduro de metilo de mares y sus alrededores son cierta y obviamente tolerados por las criaturas de ese entorno. Las aves marinas, los peces o las focas pueden sufrir de muchas cosas, pero no de los efectos de la producción local de yoduro de metilo. Tampoco parece probable que de nuestros ocasionales baños de mar se derive algún tipo de perjuicio.

El yoduro de metilo producido por las algas o termina por escapar a la atmósfera o reacciona con el agua marina para formar una sustancia más estable químicamente y aun de mayor volatilidad, el cloruro de metilo. El yoduro de metilo escapado del mar viaja por el aire, pero en cosa de horas —especialmente a la luz del sol—, se descompone liberando yodo, ese elemento esencial para la vida. Afortunadamente, el yodo es también una sustancia volátil y permanece en el aire el tiempo suficiente para ser empujado por las corrientes aéreas al interior de los continentes. Se cree que otra parte reacciona en el aire para volver a dar yoduro de metilo, pero lo importante es que, de una forma u otra, el yodo marino concentrado por las algas es arrastrado por aire hacia las masas de tierra donde es absorbido por los mamíferos —como nosotros mismos—, cuya

salud sufre graves trastornos sin él. Las algas a cuyo cargo queda esta función vital viven a lo largo de una estrecha franja que rodea a los continentes y las islas del mundo. El mar abierto es comparativamente un desierto donde escasea la vida. Poniendo la vista en Gaia, es importante pensar que el mar abierto es una especie de Sahara marino, y tener bien presente que la abundante vida de los océanos y mares se concentra en las aguas costeras y por encima de las plataformas continentales. Las propuestas de explotar estas algas a gran escala son para mí más perturbadoras, encierran una amenaza mayor, que cualquiera de los posibles efectos de los contaminantes industriales hasta aquí discutidos. La correa (denominación común de estas algas) es fuente de muchas sustancias útiles además del yodo. Las alginas, por ejemplo, esos pegajosos polímeros naturales, son aditivos valiosos en diversos productos de uso industrial y doméstico. El llevar a efecto la explotación costera a la escala que hoy se cultivan las tierras podría tener desagradables consecuencias para Gaia y para la especie humana. Un gran aumento del número de algas incrementaría subsiguientemente el flujo de cloruro de metilo (el equivalente natural de los gases propelentes de los aerosoles) creando un problema casi idéntico al que se afirma es consecuencia de la liberación de fluorocarbonos. El desarrollo de tipos de alga con mayor contenido de los polímeros antedichos sería uno de los primeros objetivos a cubrir y tales tipos quizá carecieran de la capacidad de captar el yodo disuelto en el agua o, por el contrario, se incrementaría al punto de alcanzar niveles tóxicos para otras formas de vida litoral. Otro factor es la normal proclividad de los granjeros hacia los monocultivos. Los cultivadores de correas considerarían probablemente otras algas como hierbajos y los herbívoros de la zona litoral como plagas amenazadoras para sus beneficios. Harían todo lo posible —lo que a menudo es mucho— para destruirlos. Tal eliminación quizá no importara mucho en las masas de tierra firme que reciben los beneficios de la liberalidad marina, pero estos dones son producto de un conjunto de especies que habitan fundamentalmente en las aguas costeras y las plataformas continentales, a cuyo cargo quedan servicios esenciales de tipo similar, pero claramente distintos, a los cumplidos por las laminarias. El alga *Polysiphonia fastigiata* extrae azufre del mar y lo convierte en dimetil sulfuro que pasa a la atmósfera; probablemente sea el vehículo natural del azufre en el aire. Una especie todavía por identificar realiza una labor semejante con el selenio, otro elemento vestigial fundamental para los mamíferos terrestres. La eliminación de estas "malas hierbas" del mar en interés de un mejor resultado de los cultivos podría tener consecuencias incalculables.

Las plataformas continentales cubren una amplísima zona equivalente, al menos, a la superficie de África continental. Hasta el momento, la explotación de estas regiones se realiza a pequeñísima escala, pero no debemos olvidar cuan rápidamente las prospecciones mineras han derivado en la construcción de plantas de extracción de petróleo y de gas para explotar los bancos petrolíferos que se hallan bajo las plataformas continentales. Cuando nuestra especie descubre una fuente de riqueza no suele tardar demasiado en explotarla al máximo.

Como vimos en el capítulo 5, las plataformas continentales pueden ser

básicas en la regulación del ciclo oxígeno-carbono. Gracias al enterramiento de carbono en los fangos anaerobios de los lechos marinos se asegura un aumento neto del oxígeno atmosférico. De no existir este proceso, que por cada átomo de carbono extraído del ciclo de la fotosíntesis y la respiración deja una molécula adicional de oxígeno en el aire, la concentración atmosférica de este último decaería inexorablemente hasta desaparecer casi por completo. Este es un riesgo carente de significado a corto plazo: harían falta decenas de miles de años, o incluso más, para que el oxígeno atmosférico disminuyera de forma apreciable. La regulación del oxígeno es, no obstante, un proceso gaiano clave y el que tenga lugar en las plataformas continentales sabiendo lo que ahora sabemos sobre estas regiones, parece hacer poco prudente trastear con ellas y, a la vista de lo aún por saber, hasta peligroso.

Las regiones "centrales" de Gaia, las situadas entre los 45° de latitud norte y los 45° de latitud sur, incluyen las selvas tropicales y las áreas de matorral. Si queremos evitarnos sorpresas desagradables es también necesario vigilar estas zonas de cerca. Como es bien sabido, la agricultura del cinturón tropical fracasa con frecuencia y además hay ya grandes franjas de terreno agotado; otras están siendo devastadas por los mismos métodos agrícolas primitivos que originaron las *badianas* estadounidenses. Es, sin embargo, menos conocido, otro hecho: esta mala agricultura está alterando la atmósfera a escala planetaria en medida, al menos comparable, a los efectos de la actividad industrial urbana.

La deforestación mediante incendio es práctica habitual, así como la quema anual de la hierba. Este tipo de fuegos introducen en la atmósfera, además de dióxido de carbono, un amplio surtido de compuestos químicos orgánicos y una enorme masa de partículas de aerosol. Probablemente el grueso del cloro atmosférico está hoy en forma de cloruro de metilo gaseoso, un producto directo de la agricultura tropical. Los fuegos indicados generan al menos cinco millones de toneladas anuales, cantidad mucho mayor que la liberada por la industria y probablemente también superior al escapado del mar.

El cloruro de metilo no es sino una de las sustancias que la agricultura primitiva produce en cantidades desmesuradas. La brutal perturbación de los ecosistemas naturales conlleva siempre el peligro de alterar el equilibrio normal de los gases atmosféricos. Los cambios en la tasa de producción de gases tales como el dióxido de carbono y el metano o en las partículas de aerosol pueden tener repercusiones a escala planetaria. Más aún, aunque esté allí Gaia para regular y modificar las consecuencias de nuestra perturbadora conducta debemos recordar que la devastación de los ecosistemas tropicales podría menguar su capacidad para ello.

Parece, por lo tanto, que los principales peligros que acechan a nuestro planeta como consecuencia de las actividades humanas no son precisamente los males, especiales y singularizados, que derivan de sus núcleos urbanos e industriales. Cuando el hombre industrial urbano hace algo ecológicamente incorrecto lo percibe e intenta corregirlo: las áreas realmente críticas y necesitadas de vigilancia atenta son, más probablemente, los trópicos y los mares y océanos próximos a los litorales de los continentes. Es en estas regiones, hacia los que pocos vuelven la

vista, donde las prácticas dañinas pueden alcanzar el punto de no retorno antes de advertir las consecuencias. Es de estas regiones de donde, con mayor probabilidad, pueden llegarnos las sorpresas desagradables. En ellas, el hombre debilita la vitalidad de Gaia reduciendo su productividad y suprimiendo especies esenciales para su sistema de mantenimiento vital; puede además exacerbar la situación vertiendo al aire o al mar cantidades enormes de compuestos potencialmente peligrosos a escala planetaria.

La experiencia europea, americana y china indica que, con técnicas agropecuarias adecuadas, podría alimentarse a una población mundial doble de la de hoy sin despojar a otras especies, asociadas a nosotros en Gaia, de sus hábitats naturales. Sería un grave error, sin embargo, pensar que dicha meta pueda alcanzarse sin un alto grado de tecnología, inteligentemente organizada y aplicada.

Hemos de tomar todas las precauciones necesarias para conjurar la horrible posibilidad de que a largo plazo, Rachel Carson tenga razón, pero por otros motivos. Bien podría llegar la primavera silenciosa, la primavera vacía de cantos pajariles porque las aves hayan sido víctimas del DDT y de otros pesticidas: si esto ocurriera no sería, sin embargo, consecuencia de un envenenamiento directo por estas sustancias, sino a causa de que las vidas humanas salvadas por estos agentes no habrán dejado sitio ni habitat sobre la Tierra para las aves. Como ha dicho Garret Hardin, el número óptimo de personas no coincide con el máximo que la Tierra pueda albergar, afirmación expresada con el máximo de crudeza y rotundidad por la frase: "Hay un solo contaminante: la gente".

8. Vivir en Gaia

Algunos de vosotros os habréis preguntado cómo es posible avanzar tanto en un libro que trata de las relaciones entre los seres vivos haciendo tan sólo una breve mención de la ecología. El *Concise Oxford Dictionary* define ecología como sigue: "Rama de la biología que se ocupa de las relaciones recíprocas entre los organismos y entre éstos y su entorno; (humana), estudio de la interacción de las personas con su entorno". Uno de los propósitos de este capítulo es considerar Gaia a la luz de la ecología humana. Hagamos antes una breve recensión de los últimos avances en este campo.

Entre los muchos especialistas en ecología humana distinguidos que ha dado nuestra época, hay dos que representan con máxima nitidez las opciones por las que podría inclinarse la humanidad en sus relaciones con el resto de la biosfera. Rene Dubos ha expresado vigorosamente su visión del hombre como administrador de la vida en la Tierra, en simbiosis con ésta: algo así como el gran jardinero del mundo. Es una visión esperanzada, optimista y liberal. A ella se opone frontalmente la de Garret Hardin, para quien el hombre protagoniza un esperpento trágico que puede concluir no sólo con su propia destrucción, sino también con la de todo el planeta. Señala que nuestra única vía de escape es renunciar a la mayor parte de nuestra tecnología, especialmente a la energía nuclear, pero parece dudar que tengamos facultad de elección.

Estos dos puntos de vista engloban casi toda la discusión actual que los ecologistas humanos mantienen sobre la condición de la humanidad. Existen, ciertamente, los muchos grupúsculos marginales —en casi todos los casos de tendencias anarcoides— que precipitarían gustosos el colapso desmantelando y destruyendo toda la tecnología. No está claro si sus motivaciones son primariamente misantrópicas o ludditas*, pero sean cuales sean, parecen más interesados en las acciones destructivas que en el pensamiento constructivo.

Quizá ahora empiece a estar claro por qué no hemos discutido previamente a Gaia dentro del contexto de cualquier rama de la ecología. Fuera lo que fuera esta ciencia originalmente, hoy, en la mente pública, se confunde casi del todo con la ecología humana. La hipótesis de Gaia, por otro lado, partió de observaciones realizadas en la atmósfera, de datos sobre características inorgánicas. Allí donde de vida se trata, lo verdaderamente fundamental son los microorganismos, comúnmente colocados en el escalón más bajo. La especie humana es, desde luego, uno de los hitos claves de Gaia, pero somos una aparición tan tardía que no parecía excesivamente apropiado dar comienzo a nuestra exposición discutiendo nuestras relaciones en ella. La ecología contemporánea podrá estar profundamente inserta en los asuntos humanos, pero este libro trata del conjunto de la vida terrestre dentro del marco, más general y antiguo,

* Nombre dado a las bandas organizadas de obreros ingleses que, a principios del XIX, se resistieron violentamente a la implantación de la maquinaria textil que los desplazaba (N. del T.).

de la geología. Ha llegado el momento, sin embargo, de enfrentarnos al espinoso problema: ¿Cómo hemos de vivir en el seno de Gaia? ¿Qué diferencias supone su presencia para nuestras relaciones recíprocas y con el mundo?

Sugiero empezar examinando más detalladamente la filosofía de Garrett Hardin. En honor a él ha de subrayarse que su forma de pesimismo no implica necesariamente fatalismos; se trata, utilizando su recién acuñado término, de un "peorismo", que significa la aceptación estoica de la apócrifa ley de Murphy: "Si algo puede fallar, fallará". Implica un programa de futuro basado en la asunción crítica de esta ley y del hecho de vivir en un universo sumamente desconsiderado. La clave para entender la visión hardiniana de la vida y una gran parte del pensamiento ecológico actual podría ser su paráfrasis de las tres leyes de la termodinámica:

"No podemos ganar".

"Estamos seguros de perder".

"No podemos salirnos del juego".

Este conjunto de leyes, según Hardin, más que "peorista" es trágico, habida cuenta que la esencia misma de la tragedia es la imposibilidad de escapar, y de las leyes de la termodinámica lo es: ellas rigen todo nuestro universo, y no conocemos otro.

En un contexto así sería demasiado fácil aceptar como inevitable el uso del armamento nuclear y de otros productos tecnológicos letales en el transcurso de batallas —absurdas y, éstas sí, verdaderamente trágicas— entre grupos tribales justificadas rimbombantemente en aras de la justicia, la liberación de los pueblos o la soberanía nacional, grandes conceptos tras de los cuales se esconden las auténticas motivaciones: la codicia, el poder, la envidia. Habida cuenta de que este tipo de actitud es, por desgracia, demasiado humana y está ampliamente extendida, es fácil comprender la violencia del movimiento de protesta contra la propuesta expansión de las centrales nucleares y la desconfianza de los ecologistas cuando se les dice que los fines de las centrales son exclusivamente pacíficos.

Gran parte de este librose escribió en Irlanda, donde la guerra tribal no ha cesado nunca del todo. Y sin embargo, paradójicamente, las profecías de Hardin tienen mucha mayor entidad en la atmósfera, relajada e informal, de la vida rural irlandesa que en las muy estructuradas y organizadas sociedades urbanas. Ya afirma el dicho que cuanto más lejos de la batalla, mayor es el fervor patriótico.

Volvamos a las leyes de la termodinámica. Verdad es que, a primera vista, parecen la inscripción encontrada por el Dante a las puertas del infierno; en realidad, sin embargo, aunque duras e inexorables (como los impuestos: no puede escaparse a ellas sin sufrir sanción) es posible, con la debida reflexión, suavizarlas. La segunda ley establece inequívocamente que la entropía de un sistema cerrado aumentará. Como todos nosotros somos sistemas cerrados, ello significa que todos nosotros estamos condenados a morir. Se ignora, sin embargo, muy a menudo —o se olvida deliberadamente—, que la incesante desaparición de los seres vivos,

especie humana incluida, es el complemento esencial de la incesante renovación de la vida. La sentencia de muerte contenida en la segunda ley se aplica únicamente a seres vivos, a sistemas cerrados, y podría reformarse diciendo que la mortalidad es el precio de la identidad. La familia vive más tiempo que sus miembros, la tribu más aún y el *homo sapiens* como especie ha existido durante varios millones de años. Gaia, la suma de la biota y de las partes del entorno situadas bajo su influencia, tiene probablemente una edad de unos tres eones y medio, lo que es una forma muy notable —aunque legítima— de sortear la segunda ley. Al final, la temperatura del Sol aumentará al punto de imposibilitar cualquier vestigio de vida en la Tierra, pero antes de que ello ocurra habrán pasado varios eones más. En comparación con la vida de nuestra especie —para no decir nada de un ser humano individual—, este lapso de tiempo no es ningún trágico paréntesis, sino un período lo suficientemente prolongado como para ofrecer casi infinitas oportunidades a la vida terrestre. Quienquiera que estableciera las reglas de este universo no tuvo tiempo para los que gritan ¡trampa! Los premios son sólo para los fuertes y los resueltos, para quienes poseen el talento de aprovechar cualquier oportunidad que se les presente.

Carece de sentido culpar al universo y a sus leyes de los defectos de la condición humana. Si es ofensivo para el sentido moral haber nacido en una especie de casino cósmico de reglas inflexibles y sin oportunidad de escapar, piénsese por el contrario lo maravilloso de haber sobrevivido como especie y tener además la posibilidad de planear la estrategia futura. Considera las posibilidades en contra, hace tres eones y medio: habrían sembrado dudas hasta en la mente del doctor Pangloss, ese superoptimista tan firmemente convencido de que habíamos nacido en el mejor de todos los mundos posibles. Es cierto, la segunda ley dice que no puedes ganar, que estás destinado a morir, pero la letra pequeña dice también que, mientras tu turno transcurre, puede suceder prácticamente cualquier cosa. Aunque el pensamiento de Hardin pueda conmover profundamente —como es mi caso— y uno quizá se sienta atraído por sus palabras y por la arrobadora belleza de la imagería frecuentemente utilizada, no hemos de olvidar que su ámbito es el de la ecología humana, no el de toda la biosfera.

En ciencia, especialmente en biología, es habitual la exploración microscópica y microscópica simultánea. La biología molecular, por ejemplo, derivada de aplicar el análisis químico a problemas biológicos, gracias a lo cual se produjo el descubrimiento del ADN y de su función como vehículo de información genética en todas las formas de vida, se ha desarrollado independientemente de la fisiología, que se ocupa del animal en conjunto, de cómo funciona en cuanto sistema viviente integrado. De parecida manera, la diferencia entre el concepto gaiano y el concepto ecológico de nuestro planeta deriva en parte de la historia de cada uno. El punto de partida de la hipótesis Gaia fue la contemplación de la Tierra desde el espacio, perspectiva que significó una visión del conjunto de la Tierra, no de sus detalles. La ecología está enraizada en la historia natural, en el estudio detallado de hábitats y ecosistemas, ignorando el cuadro de conjunto. En una, el bosque no deja ver los árboles y en la otra los árboles

no dejan ver el bosque. Asumiendo la existencia de Gaia podemos hacer otras suposiciones que arrojan nueva luz sobre nuestro lugar en el mundo, por ejemplo: en un mundo donde Gaia existe, nuestra especie y su tecnología son parte, simple e inevitablemente, del escenario natural. Nuestras relaciones con la tecnología liberan, sin embargo, cantidades de energía siempre crecientes y nos ofrecen una capacidad también siempre mayor de analizar y procesar información. La cibernética nos enseña que quizá logremos salvar los escollos de esta época turbulenta si nuestra pericia en el manejo de información se desarrolla más deprisa que nuestra capacidad de producir energía. Si, dicho de otra forma, somos siempre capaces de controlar el genio extraído de la lámpara. El aumento de la energía llegada a un sistema puede mejorar el bucle de ganancia ayudando por tanto a mantener la estabilidad, pero si la respuesta es demasiado lenta, el incremento energético podría ser el origen de una serie de desastres cibernéticos. Imagínate un mundo provisto del arsenal nuclear del nuestro pero carente de todo medio de telecomunicación. Un factor esencial de nuestras relaciones —recíprocas y con el resto del mundo— es nuestra capacidad de responder adecuadamente en el momento oportuno.

Dando pues por supuesta su existencia, consideremos tres características principales de Gaia que podrían modificar substancialmente nuestra relación con el resto de la biosfera:

1. La propiedad más importante de Gaia es su tendencia a optimizar las condiciones de la totalidad de la vida terrestre. Suponiendo que no hayamos interferido seriamente en ella, tal capacidad optimizadora habría de tener idéntica importancia a la que tuvo antes de la aparición del hombre en escena.
2. En Gaia hay órganos vitales, emplazados en su parte central y órganos prescindibles o redundantes, situados principalmente en la periferia. Lo que hagamos a nuestro planeta dependerá grandemente del lugar donde se lo hagamos.
3. Las respuestas que en Gaia desencadenan los cambios a peor se producen según las reglas de la cibernética, donde la constante temporal y el bucle de ganancia son factores importantes. La constante temporal de la regulación de oxígeno, por ejemplo, se mide en milenios y resulta evidente que cuando procesos tan lentos cobran tintes indeseables, las indicaciones de que ello es así son sumamente débiles. Cuando los síntomas de que algo falla aparecen y se pone remedio, la inercia hará empeorar aún más las cosas antes de que se produzca la mejoría, igualmente lenta.

En cuanto a la primera de estas características, hemos supuesto que el mundo gaiano se desarrolla mediante selección natural darwiniana, siendo su meta el mantenimiento de unas condiciones óptimas para la vida en todas las circunstancias, incluyendo las variaciones en la producción calorífica del Sol y en las del propio interior del planeta. Hemos supuesto además que, desde su aparición, la especie humana ha formado, como

las demás especies, parte de Gaia, y que como ellas ha tomado parte inconscientemente en el proceso de homeostasis planetaria.

Durante los últimos siglos, sin embargo, nuestra especie, junto con sus cosechas y su ganado, ha crecido al punto de convertirse en parte substancial de la biomasa total, mientras la proporción de energía, información y materias primas utilizada ha crecido a ritmo incluso más rápido debido al efecto magnificador a la tecnología. Parece por tanto importante preguntar, en el contexto de Gaia, cuál ha sido el efecto de todos estos acontecimientos y si el hombre tecnológico es aún parte de Gaia o es ajeno a ella en una o en varias formas.

Agradezco a mi colega Lynn Margulis haber esclarecido estas difíciles cuestiones señalando: "Toda especie modifica su entorno en mayor o menor medida para optimizar su tasa de producción. Gaia no es excepción a esta norma, al ser el resultado de la suma de todas estas modificaciones individuales y porque en lo tocante a producción de gases, nutrientes y remoción de excretas, todas las especies están conectadas entre sí". En otras palabras, que nos guste o no y con independencia de lo que podamos hacer al sistema total, continuaremos incluidos (aunque ignorándolo) en el proceso regulador de Gaia. Como no somos todavía una especie completamente social, nuestra participación se producirá tanto a nivel comunitario como personal.

Si esperar que las acciones de los individuos o las comunidades puedan poner coto al despojo de la Tierra o tener influencia sobre problemas tan serios como el crecimiento demográfico parece descabellado, piénsese en lo sucedido durante los últimos veinte años, en los que hemos empezado a ser conscientes de la existencia de problemas ecológicos a escala global. En tan corto período la mayoría de los países han aprobado nuevas leyes y normativas que limitan la libertad de los empresarios y de la industria, en interés de la ecología y del entorno. La realimentación negativa ha tenido la importancia suficiente como para afectar seriamente al crecimiento económico. Muy pocos —de haber alguno— de los adivinos y lumbreras que dejaron oír sus voces durante los primeros sesenta predijeron que pocos años más tarde el movimiento ecológico sería uno de los factores limitativos de la expansión económica y sin embargo lo es, bien directamente, exigiendo a la industria que invierta parte de sus beneficios en la instalación de sistemas para depurar los desechos producidos (por ejemplo), o bien indirectamente, al destinar recursos de investigación y desarrollo (originalmente dedicados a la introducción de nuevos productos) a los esfuerzos que la resolución de problemas ambientales exige. Las causas ecológicas no son siempre tan válidas como, por ejemplo, la protesta contra el abuso de pesticidas, práctica nefasta que convierte un instrumento útil y eficaz para controlar las plagas en una agresión indiscriminada a la biosfera. Ciertos ecologistas denunciaron errores de diseño en el oleoducto de Alaska, destinado al transporte de petróleo a los Estados Unidos. Sus objeciones eran sensatas, pero la campaña, farisaica y desmedida, organizada por otros, retrasó tan eficazmente su construcción que la escasez de energía de 1974 fue en gran parte provocada por ella y no, como habitualmente se afirma, resultado del incremento de precio decretado por otras naciones productoras de crudos. El costo de este retraso se ha estimado en unos 30.000 millones

de dólares. La explotación de la ecología humana con fines políticos puede terminar por convertirse en nihilismo, en lugar de ser un impulso reconciliador entre la humanidad y la naturaleza.

Con respecto a la segunda característica, hemos de preguntarnos qué regiones de la Tierra son vitales para el bienestar de Gaia y sin cuales podría pasarse, asunto sobre el que ya disponemos de información útil. Sabemos que las regiones del globo no comprendidas entre los 45° norte y los 45° sur están sujetas a glaciaciones, durante las cuales grandes extensiones de nieve o de hielo esterilizan totalmente el suelo haciéndolo confundirse en algunos sitios con el mismo lecho de roca. Aunque la mayoría de nuestros centros industriales se hallan en las regiones septentrionales templadas sometidas a glaciaciones, ninguno de los efectos de la actividad industrial en estas regiones puede compararse con la devastación natural causada por el hielo. Parece, por lo tanto, que Gaia puede tolerar la pérdida de estas partes de su territorio, el 30 por ciento aproximadamente de la superficie terrestre (sus pérdidas actuales son inferiores, dado que entre glaciación y glaciación quedan las zonas de hielo y permafrost). En el pasado, sin embargo, las fértiles regiones tropicales no habían sufrido la acción humana, pudiendo compensar, por tanto, las pérdidas sufridas durante las glaciaciones. ¿Podemos estar seguros de que la Tierra resistirá otra Edad de Hielo habiendo sido despojada de las selvas de sus regiones centrales, lo que bien puede haber sucedido dentro de algunos decenios más? Es demasiado fácil pensar que los problemas ambientales (de contaminación, por ejemplo) se dan exclusivamente en las naciones industriales. Muy oportuna fue la contribución de una autoridad como Bert Bolín, que estableció en qué medida y con qué rapidez se está llevando a cabo la destrucción de las selvas tropicales, y determinó algunas de las posibles consecuencias de su pérdida. Incluso si la especie humana sobreviviera, podemos estar bien seguros de que la destrucción de los intrincados ecosistemas de las selvas tropicales supondría una gran pérdida de oportunidades para todas las criaturas de la Tierra.

No cabe duda de que la selección natural se encargará de decidir oportunamente lo que es más apto para sobre vivir: una población humana máxima viviendo en el límite mismo de la subsistencia y enmarcada en un semidesierto planetario —última etapa del estado-beneficiencia— o un sistema social menos costoso y de menor número de personas. Podría arguirse que un mundo cuya población se cuente por decenas de miles de millones no es sólo posible sino tolerable, mediante el continuo desarrollo de la tecnología: pues bien, el grado de regimentación, autodisciplina o sacrificio de la libertad personal que por necesidad habría que imponer a cada uno de los miembros de un mundo tan atestado lo harían inaceptable según muchos de nuestros criterios actuales. Hemos de tener presente, sin embargo, que tanto las condiciones chinas como las británicas son indicativas de que las altas densidades de población no hacen necesariamente imposible o desagradable la vida. El conocimiento y la comprensión plenos de los límites territoriales de Gaia desempeñarían un papel esencial en nuestro éxito como especie; sería imprescindible mantener escrupulosamente la integridad de las regiones clave en la

regulación de la salud planetaria.

Con suerte, quizá descubramos que los órganos vitales del cuerpo de Gaia no están en las superficies terrestres sino en los estuarios, los pantanos y en los fangos de las plataformas continentales. Es aquí donde el ritmo de enterramiento de carbono se ajusta automáticamente al oxígeno disponible y donde son devueltos a la atmósfera elementos esenciales. Hasta saber bastante más sobre la Tierra y sobre el papel de estas regiones, haríamos mucho mejor en considerarlas terrenos no explotables.

Son posibles, obviamente, otras áreas claves inesperadas. No sabemos, por ejemplo, cuál es la cuantía del metano que los microorganismos anaerobios envían a la atmósfera. Como se indicó en el capítulo 5, la producción de metano puede ser relevante en el control del oxígeno, pero algunas de estas comunidades anaerobias no viven en los lechos marinos sino en nuestro intestino y en el de otros animales. Hutchinson, en su estudio sobre la bioquímica de la atmósfera, pionero de la especialidad, sugería esta fuente como origen de casi todo el metano atmosférico. No es imposible que en el metano y demás gases intestinales radique el factor decisivo. El vuelo de los cuescos, podría uno pensar, pero es un buen ejemplo para ilustrar cuan escasos son todavía nuestros conocimientos. Nos recuerda igualmente que, independientemente de nuestras preferencias, las funciones realizadas en el sistema vivo de Gaia son en ocasiones bien humildes.

El examen detallado de los ciclos reguladores de la concentración atmosférica de oxígeno ilustrada en el capítulo 5 pone de manifiesto una red de intrincadas conexiones, tan compleja que desafía el análisis completo. Esto nos trae al tercer problema de Gaia, a saber: es un organismo cibernético. Las muchas posibilidades por las que puede discurrir la regulación suelen ir asociadas a diferentes constantes de tiempo y a distintas capacidades funcionales o, como diría el ingeniero, bucles de ganancia variables. Cuanto mayor sea la parte de la biomasa terrestre ocupada por la humanidad, las cosechas y los rebaños del hombre, más nos afecta la transferencia de energía, solar y de otra clase, en el sistema. Con la realización de esta transferencia energética crece nuestra responsabilidad en el mantenimiento de la homeostasis planetaria, seamos conscientes del hecho o no. Cada vez que alteramos significativamente alguna parte de un proceso regulador o introducimos en él una nueva fuente de energía o información, acrecentamos la probabilidad de que una de estas modificaciones debilite la estabilidad de todo el sistema al reducir el número de respuestas posibles.

En cualquier sistema funcionando cuya meta sea la homeostasis, las desviaciones del óptimo general causadas por cambios en los flujos energéticos en los tiempos de respuesta tienden a corregirse buscando un nuevo óptimo que incorpore los cambios; resulta imposible que un sistema tan experimentado como Gaia sea fácilmente perturbable. Tendremos, no obstante, que andarnos con mucho cuidado para evitar desastres cibernéticos tales como la realimentación positiva en cascada o la oscilación sostenida. Si, por ejemplo, los métodos de control climatológico descritos fueran gravemente alterados, la consecuencia podría ser el

sofocón de una fiebre planetaria o los estremecimientos de una glaciación; la tercera posibilidad, la oscilación sostenida, incorpora a los dos desagradables estados acabados de mencionar: pasaríamos sucesivamente de uno a otro.

Esto podría suceder si, llegados a una intolerable densidad de población, la actividad humana hubiera deteriorado de forma incapacitante los poderes de Gaia. El hombre se encontraría entonces ocupando el poco envidiable cargo (a desempeñar además hasta el fin de sus días) de ingeniero de reparaciones planetario. Gaia habría retrocedido a los fangos dejando para nosotros la tarea, complejísima e inacabable, de mantener en buen funcionamiento todos los ciclos del planeta. Seríamos finalmente los pasajeros de ese extraño artilugio, la "nave espacial Tierra"; lo que, domesticado y atendido, quedara de la biosfera sería verdaderamente nuestro "equipo de supervivencia". Nadie sabe todavía cual es el número óptimo en la especie humana: el equipo analítico requerido para contestar a esta pregunta debe aún desarrollarse. Suponiendo el actual consumo de energía per capita, podría decirse que, por debajo de los 10.000 millones, seguiríamos estando en el mundo de Gaia, pero más allá de esa cifra, especialmente si el consumo de energía aumenta, nos aguarda o la esclavitud permanente en el casco-cárcel de la nave espacial Tierra o la megamuerte, de modo que quienes sobrevivan puedan intentar la resurrección de Gaia.

Lo que de especial tiene el hombre no es el tamaño de su cerebro, equivalente al de un delfín, ni su incompleto desarrollo como animal social, ni siquiera la facultad del habla o la capacidad de utilizar herramientas. El hombre es especial porque de la combinación de todas estas cosas ha surgido una entidad enteramente nueva. Cuando estuvo organizado socialmente y logró proporcionarse una tecnología (aunque fuera tan rudimentaria como la que poseía un grupo tribal de la Edad de Piedra) el hombre empezó a utilizar un talento totalmente nuevo: el de obtener, conservar y elaborar información, empleada después para manipular el entorno de modo deliberado y previsor.

Cuando los primates, siguiendo las etapas evolutivas de las hormigas, constituyeron por vez primera una colonia inteligente, su potencial para modificar la faz misma de la Tierra fue algo tan revolucionario como la aparición, eones antes, de los primeros organismos fotosintetizadores que producían oxígeno. Desde sus mismos comienzos, esta nueva organización tuvo la capacidad de modificar el entorno a escala planetaria. Hay pruebas fehacientes, por ejemplo, de que cuando la joven humanidad, cruzando el estrecho de Bering, llegó a Norteamérica, su presencia significó el exterminio de diferentes especies animales,

grandes mamíferos sobre todo, a escala continental y en muy pocos años. Las artes cinegéticas de la época, crueles y perezosas, no eran excesivamente refinadas: la tribu obtenía sus piezas incendiando una línea de bosque y aguardando la aparición de los animales en un lugar convenciente. Empujados por el fuego, iban a clavarse en los utensilios punzantes de los cazadores. Se trataba simplemente de recurrir a una nueva tecnología usándola de modo ecológicamente desastroso (y sin embargo, como Eugene Odum nos recuerda, el empleo de este método

produjo el desarrollo de los ecosistemas de las grandes planicies herbosas).

Si hacemos un rápido examen de la historia de la humanidad en tanto que especie colectiva, dirigiendo nuestra atención particularmente a sus relaciones con el entorno planetario, aparecen ante nuestros ojos una serie de repeticiones. Hay períodos de rápido desarrollo tecnológico que concluyen en lo que parece ser una catástrofe medioambiental. Les siguen largos intervalos de estabilidad y coexistencia transcurridos en ecosistemas nuevos, modificados. El método de caza mediante incendio que acabamos de describir produjo la destrucción de los ecosistemas selváticos, pero fue también causa de un período de coexistencia y de la aparición de ecosistemas del tipo de la sabana. Hay un ejemplo más cercano —señala Dubos— en las Actas de Cercamiento inglesas, leyes denegatorias del libre acceso a las tierras comunales; a ellas, consideradas en la época de su promulgación como un desastre ambiental, debe el paisaje británico su aspecto característico y su gran riqueza en un habitat determinado, el seto vivo. Se lamenta hoy mucho la desaparición de los setos a causa de la conversión de la agricultura en el "agronegocio", pero como pregunta adecuadamente Dubos, ¿no volverá a llorarse la pérdida del nuevo ecosistema cuando de paso a su vez, a algún futuro avance tecnológico? Esta progresión podría ser definida como la "ley del abuelo", que establece la superior bondad de las cosas de los viejos tiempos.

Es inevitable que los acontecimientos de la evolución causen malestar en el orden establecido, y ello sucede en todos los órdenes de lo vivo. En el más bajo, el de los virus, uno causante tan sólo de molestias puede convertirse en letal por obra de una mutación, como sucedió con una cepa de virus gripal en 1918, cuando una pandemia de "gripe española" causó un número de muertes superior al de la totalidad de las bajas acaecidas en la Primera Guerra Mundial. Otro ejemplo fue la nueva organización de la hormiga roja, tan eficaz que gracias a ella pudo invadir y colonizar el continente norteamericano. Cualquiera que haya tenido la desgracia de causar algún tipo de molestias a las ocupantes de un nido sabe el dolorosísimo tratamiento reservado para los invasores.

Nuestro continuo desarrollo en tanto que animales sociales inteligentes ligados a la tecnología por unos lazos de dependencia cada vez más estrechos ha perturbado inevitablemente el resto de la biosfera y seguirá haciéndolo así. El hombre podrá tener una tasa de mutación muy baja, pero el ritmo al que cambia esa asociación colectiva denominada humanidad se acelera continuamente. Richard Dawkins ha señalado que, en este contexto, todos los avances tecnológicos grandes o pequeños pueden considerarse análogos a mutaciones.

El notable éxito de nuestra especie deriva de su facultad de reunir, comparar y determinar, las respuestas a las preguntas medioambientales, acumulando de este modo lo que en ocasiones se denomina conocimiento tribal o convencional. Originalmente transmitido boca a boca de una generación a la siguiente, se ha convertido hoy en una asombrosa cantidad de información almacenada. Un pequeño grupo tribal no separado todavía de su habitat natural vive una interacción intensa con el entorno y cuando se producen enfrentamientos entre la sabiduría convencional y la

optimización gaiana, la discrepancia se percibe rápidamente y se corrige al punto. Quizá por esta razón las vidas de grupos como los esquimales o los bosquimanos están, aparentemente, tan bien adaptadas, son las óptimas para los entornos de extremo rigor en los que se enmarcan. Es ya un tópico que cuando han entrado en contacto con los conocimientos de nuestras sociedades urbanas e industriales, más amplios y difusos, han salido generalmente perjudicados. Muchos de nosotros hemos contemplado esas patéticas imágenes de esquimales "civilizados": sentados en cabañas prefabricadas, fuman cigarrillo tras cigarrillo, doliéndose del destino de sus hijos que, lejos de casa, aprenden a leer y escribir, en lugar de cómo vivir en el Ártico.

Al intensificarse el carácter urbano de las sociedades, el flujo de información que va de la biosfera al conglomerado de saberes denominado conocimiento urbano disminuyó, comparado con el que siguió impregnando el acervo cultural de las comunidades agrícolas o cazadoras. Al mismo tiempo, las complejas interacciones humanas propias de la ciudad producían nuevos problemas que no podían ser desatendidos; fueron resueltos y almacenadas las soluciones. No tardó mucho el saber urbano en consagrarse casi por completo a los problemas de las relaciones humanas, contrastando con los grupos tribales que aún reservan el lugar debido para las relaciones con el resto del mundo, animado e inanimado.

Siempre me ha parecido asombrosa la forma en que Descartes asimilaba los animales a las máquinas —dado que unos y otras carecían de alma—, mientras para el hombre, provisto de alma inmortal, quedaba la conciencia y el pensamiento racional. Siendo Descartes, como era, extremadamente inteligente, resulta increíble que fuera tan poco observador como para alegar que sólo el hombre sentía conscientemente el dolor y que la crueldad con un caballo o un gato no tenía importancia alguna, ya que su vivenciación del dolor no superaba la que pudiera tener cualquier objeto inanimado, una mesa por ejemplo. Creyera o no en ella, esta detestable noción gozó de gran predicamento entre sus contemporáneos y sigue estando vigente desde la época del filósofo. Ilustra ejemplarmente hasta qué punto la sabiduría convencional de una sociedad urbana cerrada deviene alienada del mundo natural. Confiemos en que esta enajenación esté llegando a su fin y que los medios de comunicación (especialmente las magníficas series televisivas sobre historia natural y temas afines) ayuden a desterrarla del todo. Nos hallamos actualmente en el centro de una explosión de las comunicaciones; en breve, cada pantalla de TV será una ventana abierta al mundo, aunque ya ha expandido e incrementado enormemente la cuantía, el ritmo y la variedad del flujo de información. Quizá estemos saliendo finalmente de unas aguas estancadas que brotan de la vida medieval.

Nos hemos exployado hasta aquí sobre lo que podría ir mal en el futuro, pero hay una forma más optimista de ver las cosas. La mayoría de los periódicos dan cabida en sus páginas a la publicidad de seguros de vida cuyas promesas de substanciosas cantidades entregadas en la ancianidad a cambio de una módica cuota mensual resultan atrayentes para muchos lectores de edad inferior a los cuarenta años. La actividad, aún pujante, de las compañías de seguros, es buena pueba de la fe que la mayoría de la

gente tiene en el futuro. Hermán Kahn, ese gran profeta de lo por venir, ve una América de 600 millones de habitantes en el próximo siglo, cuya densidad de población será, mayoritariamente, del orden de unas 2.000 personas por milla cuadrada, equivalente a la densidad actual de Westchester County. Cree —y lo justifica convincentemente— que esa población, además de vivir en un mundo mucho más desarrollado que éste tendrá a su disposición un suministro inagotable de todo cuanto es esencial para la vida. Casi todos esos profesionales que reúnen información sobre los recursos mundiales y la estudian con la ayuda de poderosas herramientas, se muestran de acuerdo en que las tendencias expansivas de la demografía y la tecnología continuarán durante, por lo menos, treinta años más.

La mayoría de los gobiernos y muchas importantes multinacionales, o bien se aseguran los servicios de alguno de estos profetas o instalan sus propios gabinetes de predicción que, compuestos por expertos brillantes y equipados con el *hardware* más sofisticado, centralizan información de todo el mundo y la filtran utilizando los datos resultantes para construir hipótesis —o modelos, empleando el término hoy más usado— refinadas una y otra vez hasta que el futuro puede contemplarse con una claridad parece ser que comparable a la ofrecida por las pantallas de los primeros televisores. Paralelamente a estos avances de la "futurología", aumenta a diario el número de científicos que realizan sus proyectos de investigación tomando como referencias modelos semejantes, llevan a cabo las medidas experimentales e introducen los resultados en un computador donde son comparados con las predicciones de una hipótesis. Si discrepan, se intentan localizar posibles errores o se descarta el modelo y se prueba con otro, intentando encontrar una concordancia más estrecha. Cuando el científico que reúne los datos experimentales es también el constructor del modelo o encomienda esta tarea a un colega cercano, todo sale a las mil maravillas. La rapidez con la que el computador puede realizar la labor de cálculo de otro modo agotadora, potencia enormemente la combinación; pronto puede seleccionarse la hipótesis más adecuada para promover una teoría. Desgraciadamente la mayoría de los científicos viven en las ciudades y tienen poco o ningún contacto con el mundo natural. Construyen sus modelos de la Tierra en universidades o en instituciones que disponen de todo el talento y el equipo necesario, pero tiende a faltar ese vital ingrediente, la información recogida de primera mano. En estas circunstancias es una tentación natural suponer que la información contenida en los libros y publicaciones científicas es adecuada, y que si no concuerda con el modelo será en los hechos donde esté el error. A partir de ahí es sencillísimo dar el paso fatal: seleccionar únicamente datos que se ajusten al modelo. Pronto habremos construido una imagen no del mundo real, que podría ser Gaia, sino de esa obsesiva alucinación, Calatea, la hermosa estatua de Pigmalión.

Hablo de algo personalmente vivido cuando digo que somos muy pocos los científicos que elegimos el viaje o la expedición para llevar a cabo in situ la toma de datos sobre la atmósfera, el océano y sus interacciones con la biosfera, comparados con los que realizan sus trabajos de investigación sin moverse de universidades o instituciones radicadas en ciudades. Es

raro el contacto personal entre exploradores y quienes construyen el modelo; para transmitir la información se utiliza la fraseología, limitada y tersa, de los artículos científicos, donde no hay lugar para observaciones sutiles, calificadoras, que acompañen a los datos. No resulta en absoluto sorprendente que, con demasiada frecuencia, los modelos sean galateicos.

Si pretendemos vivir en armonía con el resto de Gaia, es preciso corregir cuanto antes este desequilibrio; necesitamos un flujo continuo de información precisa concerniente a cuantos más aspectos de nuestro mundo, mejor. La confección de modelos con datos atrasados e imprecisos es tan absurda como predecir el tiempo de mañana utilizando un computador gigante y los datos meteorológicos de treinta días atrás. Adrián Tuck, que trabaja con la British Meteorological Office, acostumbra a señalarme cuán saludable es recordar que la más experimentada y profesional de todas las ciencias predictivas es la meteorología. La predicción meteorológica actual tiene a su servicio la red de recogida de datos más extensa y fiable, dispone de los computadores más poderosos del mundo y algunos de los miembros de nuestra sociedad dotados de mayor talento y capacidad trabajan para ella y, sin embargo, ¿qué grado de certeza tienen las previsiones a un mes vista, para no decir nada de las formuladas a plazos más largos?

Del mismo modo que quienes se someten a privación sensorial sufren alucinaciones, podría ser que quienes confeccionan los modelos, habitantes de ciudad, fueran propensos a construir pesadillas más que realidades. Nadie que haya experimentado la absorbente actividad que es la construcción de modelos de computador negará la tentación de utilizar los datos convenientes para continuar jugando a lo que bien podría ser el solitario definitivo.

Tal como están las cosas, nuestra ignorancia sobre las posibles consecuencias de nuestras acciones es tan grande que las predicciones útiles del futuro quedan prácticamente descartadas. La polarización política de nuestro mundo y la fragmentación de la sociedad en pequeñas entidades tribales miopes dificulta cada día más la exploración y la recogida científica de datos, lo que no contribuye precisamente a mejorar la situación. Ninguno de los grandes viajes de exploración del siglo pasado, como las expediciones del *Beagle* o del *Challenger*, podrían llevarse hoy a término sin impedimentos o retrasos. Con razón o sin ella, las naciones en vías de desarrollo tienden a considerar los navíos de investigación como agentes de la explotación neocolonialista en busca de las riquezas minerales contenidas en sus plataformas continentales. En 1976, los argentinos dieron un paso más en esta dirección al abrir fuego sobre el *Shackleton* que, en viaje de investigación, navegaba en las proximidades de las islas Falkland. De modo similar, resulta hoy difícil para un científico independiente entrar con equipo de observación atmosférica en muchos países tropicales. La investigación científica parece haber sido nacionalizada: o la lleva a cabo un ciudadano del país o no lo hace nadie. Haya o no una justificación histórica o real para tales temores a ser explotados, lo cierto es su amplia generalización en la mitad tropical del mundo; en consecuencia, la investigación científica a escala global se hace

progresivamente más difícil.

Aunque dudemos de la adecuación de los modelos que del mundo por venir están confeccionando los moradores de los "tanques de cerebros", hay algo que parece cierto sobre el futuro próximo: no podemos renunciar voluntariamente a la tecnología. Estamos tan inextricablemente ligados a la tecnosfera que intentar abandonarla sería algo tan falto de realismo como si el pasajero de un transatlántico saltara por la borda en medio del océano para, en gloriosa independencia, hacer a nado el resto de la travesía. Muchos han sido los grupos que han tratado de escapar a la sociedad moderna y volver a la naturaleza. Casi todos han fracasado, y cuando se examinan los escasos éxitos parciales,

siempre parece haber una fuerte dosis de apoyo por parte del resto de nosotros, caso análogo a ciertas situaciones comentadas en el capítulo 6, los entornos extremos —hablábamos de arroyos de agua hirviendo o lagos salobres— que eran felizmente colonizados por microorganismos o, en ocasiones, por formas de vida más complejas. Decíamos que si estos colonizadores sobrevivían era únicamente porque el resto de nosotros en Gaia les suministraba continuamente oxígeno, sustancias nutritivas y demás elementos necesarios. De igual modo que la tolerancia hacia la excentricidad personal es rasgo distintivo de las civilizaciones prósperas, las excentricidades biológicas se dan tan sólo en un planeta floreciente. (Esta es, a propósito, una razón más por la cual la búsqueda de las escasas formas de vida que habrían podido adaptarse a las rigurosas condiciones de Marte será probablemente en vano). Una solución más prometedora a los problemas que nosotros mismos nos hemos creado es la ofrecida por el movimiento en pro de una tecnología apropiada o alternativa. Hay en él un honesto reconocimiento de nuestra dependencia de la tecnología, intentando simultáneamente seleccionar sólo aquéllas de sus manifestaciones cuyas exigencias en recursos naturales son razonables y modestas.

Nuestros intentos de dar solución a las escasez de recursos naturales parecen subestimar permanentemente las posibilidades de la prensa y de los sistemas de telecomunicación, no sólo por lo que respecta a su capacidad de influir en los acontecimientos presionando sobre las instituciones y grupos oportunos (tal como señalaba la muy usada expresión "el poder de la prensa"), sino también mediante su capacidad de mantener informado de lo que ocurre a casi todo el mundo la mayor parte del tiempo. Ya hemos señalado que la rápida diseminación de la información sobre el medio ambiente ayuda a reducir la constante temporal de nuestra respuesta a los cambios adversos.

No hace demasiado tiempo parecía que la humanidad fuera el cáncer del planeta. Habíamos cortado, aparentemente, los bucles de realimentación de la peste y las hambrunas que regulaban nuestro número. Crecíamos sin restricciones a expensas del resto de la biosfera, mientras al mismo tiempo nuestra contaminación industrial y los agentes antibióticos químicos como el DDT envenenaba a las pocas criaturas que no habíamos arrancado de sus hábitats. Ciertamente es que el peligro está por conjurar en algunos lugares, pero la población ha dejado de crecer indiscriminadamente en todos lados, la industria es mucho más consciente de sus repercusiones sobre el medio

ambiente y sobre todo hay una toma de conciencia pública que se extiende por doquiera. Podemos aducir que el esparcir información concerniente a nuestros problemas está provocando el desarrollo de un nuevo proceso, si no de solución, si al menos de control. Hemos de felicitarnos por no necesitar ya de los brutales reguladores demográficos que son las epidemias y las hambrunas. En muchos países, el control de la natalidad es una práctica espontánea cuyo origen es el deseo de una mayor calidad de vida, raramente posible cuando los hijos son muy numerosos. No debemos olvidar nunca, sin embargo, que esta fase puede ser provisional y que como C. G. Darwin nos advierte, la selección natural se oponga al control demográfico voluntario y lleve al *homo philoprogenitus* a la victoria: si así fuera, nuestro crecimiento numérico tendría lugar a un ritmo incluso más veloz que el primero.

La revolución de la tecnología de la información está llamada a provocar en el mundo del futuro cambios que actualmente nadie es capaz de concretar. En un significativo trabajo publicado por el *Scientific American* en 1970, Tribus y McIrvine desarrollaban el tema "conocimiento es poder" de un modo verdaderamente exhaustivo. Señalaban, entre otras muchas cosas, que una forma de interpretar la liberalidad del Sol era considerarla como el regalo continuo de 10^{11} unidades de información por segundo, en lugar de expresarlo con los 5×10^7 megavatios/hora habituales. Hemos visto en páginas anteriores que nos hallamos cerca de los límites de lo que pueda hacerse con esta energía, pero si somos capaces de domesticar ese flujo de información los límites serán casi inexistentes. Con la ayuda del *hardware* desarrollado, nos embarcamos con placer creciente en las primeras explotaciones de ese rico mundo de información, el espacio idea. ¿Conduciría esto a otra perturbación medioambiental? ¿Significa la creciente entropía del lenguaje, su deterioro, que ha empezado ya la contaminación del espacio idea?

Hay un tiempo para cada cosa, hay un tiempo para cada intención bajo el cielo: Un tiempo de nacer y un tiempo de morir, un tiempo de sembrar y un tiempo de cosechar lo sembrado.

Regreso para ver que, bajo el sol, no gana la carrera el veloz, ni la batalla el fuerte, ni hay pan para el discreto, ni riquezas para los hombres de sabiduría, ni favor para los diestros, sino que el tiempo y el azar se cuidaban de todos.

La belleza es verdad, la verdad belleza, eso es todo:

De la Tierra sabéis y nada os falta.

No existen recetas, no hay códigos para vivir en el seno de Gaia. Sólo las consecuencias de nuestros actos, cada cual de los suyos.

9. Epílogo

Mi padre nació en 1872 y creció en Berkshire Downs, al sur de Wantage. Era un excelente y entusiasta jardinero y tenía una personalidad encantadora. Le recuerdo salvando unas avispas que habían caído en la pila y corrían peligro de ahogarse. Me dijo que si estaban ahí era para algo y luego me explicó cómo mantenían a raya a los áfidos de los ciruelos y que, teniendo en cuenta la perfección con que desempeñaban su trabajo, bien se merecían algunas de las frutas en pago.

No tenía creencias religiosas formales y no pertenecía a iglesia alguna. Tengo la impresión de que su sistema moral derivaba de esa mezcolanza de cristianismo y magia tan común entre las gentes del campo: para ellas, tanto el primer día de mayo como la Pascua son motivo de ceremonia y regocijo. Sentía instintivamente su parentesco con todos los seres vivos y aún recuerdo cuanto dolor le producía ver un árbol cortado. Debo buena parte de mis sentimientos hacia las cosas naturales a los paseos dados con él por antiguos caminos y senderos que serpenteaban entre la campiña y que gozaban, o parecían gozar en aquellos días, de una tranquilidad decorosa y dulce.

Si he comenzado el capítulo con estos apuntes autobiográficos ha sido para iniciar con mayor facilidad el examen de los aspectos más especulativos e intangibles de la hipótesis de Gaia: los que conciernen al pensamiento y a la emoción en la interrelación del hombre y Gaia.

Empecemos por nuestro sentido de la belleza. Al decir sentido de la belleza, hablo de esos complejos sentimientos de placer, reconocimiento, plenitud, asombro, excitación y anhelo que nos invaden cuando vemos, palpamos, olemos o escuchamos algo que acrecienta nuestra autoconciencia y al mismo tiempo profundice nuestra percepción de la verdadera naturaleza de sus cosas. Se ha dicho frecuentemente —por algunos *ad nauseam*— que estas placenteras sensaciones están inextricablemente ligadas a esa extraña hiperestesia del amor romántico. Aunque así sea, no parece necesario tener que atribuir el placer sentido paseando por el campo, mientras la mirada se pierde sobre suaves colinas a que asimilamos instintivamente los contornos redondeados de éstas a los de un pecho femenino. En realidad, tal pensamiento podría ocurrirnos, pero nuestro placer es también explicable en términos de Gaia.

Parte de la recompensa implícita en el cumplimiento de nuestro rol biológico mediante la creación de un hogar, de una familia es un sentimiento subyacente de satisfacción. A pesar de lo dura y lo descorazonadora que esta tarea haya podido ser a veces, a un nivel más profundo nos sentimos agradablemente conscientes de haber hecho lo que debíamos, de habernos mantenido en la corriente de la vida. Cuando por una u otra razón nos hemos desorientado o las cosas no van bien nos colma una sensación tan perceptible como la anterior, pero dolorosa, de pérdida y fracaso. Quizá estemos también programados para reconocer instintivamente nuestro rol óptimo en relación con las demás formas de vida a nuestro alrededor. Cuando, en nuestras relaciones con las demás partes de Gaia, actuamos según nos dicta este instinto, somos

recompensados por la constatación de que lo que parece correcto es también hermoso, apareciendo esas placenteras sensaciones cuyo conjunto es nuestro sentido de la belleza. Cuando la relación con lo que nos rodea se pervierte o se deteriora, la consecuencia es una sensación de vacío, de carencia. Muchos de nosotros hemos experimentado el choque que supone encontrar el pacífico valle de nuestra niñez, donde crecía el tomillo y los setos estaban coronados de eglantinas, convertido en una extensión uniforme de cebada (pura y sin malas hierbas) desprovista de la menor característica propia.

El que nos asalten sensaciones placenteras —estímulo, además, para preservar— cuando establecemos una relación equilibrada con las demás formas de vida es congruente con las fuerzas darwinianas de la selección natural. El milenario New Forest del sur de Inglaterra, en una época coto de caza privado de Guillermo el Conquistador y sus barones normandos, es todavía un lugar de increíble belleza, patrullado de noche por tejones y en el que los ponies tienen preferencia de paso sobre peatones y vehículos de motor. Aunque estas históricas 130 millas cuadradas de bosque y brezal están bajo la protección de Decretos Parlamentarios especiales, sobreviven realmente gracias a nuestra incesante vigilancia, ya que en la actualidad son campo de recreo para miles de excursionistas, campistas y turistas que vierten en él 600 toneladas de basuras anuales y que, en ocasiones, dejan caer descuidadamente una cerilla o un cigarrillo sin apagar, provocando incendios que en horas destruyen muchos acres de algo cuya existencia ha requerido el ejercicio de una relación equilibrada entre el bosque y sus moradores durante siglos.

Otro instinto nuestro que probablemente trabaje también en pro de la supervivencia es el que asocia la adecuación física y las proporciones debidas a la belleza individual. Nuestros cuerpos están formados por células cooperativas; cada una de ellas, es decir, cada soma celular provisto de núcleo, es la asociación simbiótica de entidades más pequeñas. Si un ser humano, producto de todo este esfuerzo cooperativo, resulta hermoso cuando está correctamente ensamblado, ¿es descabellado sugerir que, guiados por idéntico instinto, quizá reconozcamos la belleza y la adecuación de determinado entorno, cuya génesis implica la reunión de un grupo de animales —incluyendo al hombre— y otras formas de vida?

Sería espantosamente difícil verificar experimentalmente la noción de que el instinto de asociar adecuación a belleza favorece la supervivencia, pero valdría la pena intentarlo. Me pregunto si, una vez establecida tal noción, podríamos valorar la belleza objetivamente en lugar de hacerlo con mirada de poseedor. Hemos visto cómo la capacidad de reducir la entropía —o dicho con los términos de la teoría de la información, para reducir la incertidumbre de mis respuestas a las cuestiones sobre la vida— es, en sí misma, una medida de la vida. También la belleza, podría seguirse de lo anterior, está asociada con mengua de la entropía, disminución de la incertidumbre y menor vaguedad. Quizás siempre hayamos sabido esto ya que, después de todo.

forma parte de nuestro programa interno de reconocimiento de la vida. Por ello, y mirando con los ojos de Blake, hasta nuestro depredador nos

parece hermoso:

¡Tigre! ¡Tigre! resplandor ardiente
de las florestas de la noche
¿Qué ojo inmortal, qué mano
tu simetría temible retuviera?

¿En qué abismos profundos, en qué cielos
destellaba la hoguera de tus ojos?
¿Qué altas alas audaces necesita?
¿Dónde la fuerte mano que retendrá la llama?

Podría ser incluso que el ideal platónico de belleza absoluta significara algo, que la naturaleza misma de la vida, ese inaccesible estado de certidumbre, pudiera medirse contra él.

Mi padre nunca me dijo porqué creía que todo cuanto había en el mundo tenía una razón de ser; imagino que sus pensamientos y sentimientos sobre la campiña estaban basados en una mezcla de instinto, observación y sabiduría tribal, ingredientes que aún permanecen diluidos en muchos de nosotros y que todavía son lo bastante fuertes como para dar impulso a movimientos ecologistas llamados a convertirse en fuerzas cuya existencia ha de ser tenida en cuenta por otros poderosos grupos de presión de nuestra sociedad. Como consecuencia de ello, las iglesias de las religiones monoteístas y las recientes herejías del humanismo y el marxismo se enfrentan a la desagradable verdad de que su viejo enemigo, el pagano de Wordsworth "a los pechos criado de gastada doctrina", está aún vivo, parcialmente al menos, en nuestro interior.

En épocas pasadas, cuando las epidemias y las hambrunas regulaban el tamaño de nuestra especie, parecía bueno y conveniente intentarlo todo para sanar al enfermo y preservar la vida humana, actitud que posteriormente cristalizaría en la creencia de que la Tierra había sido hecha para el hombre, para dar completa satisfacción a sus necesidades y a sus deseos. En sociedades o instituciones autoritarias parecía absurdo dudar de la prudencia o la sabiduría de talar un bosque, represar un río o construir un complejo urbano. Todo cuanto significara aumento de los bienes materiales, y por eso mismo, se consideraba correcto. La preocupación moral se limitaba estrictamente a impedir el soborno y la corrupción, asegurando también un reparto justo de beneficios.

La angustia que hoy sienten muchos a la vista de dunas, pantanos salobres, bosques, pueblos incluso, brutalmente destruidos, borrados de la faz de la Tierra por la maquinaria pesada, es un sentimiento muy real. No es ningún consuelo oír que lamentarse es reaccionario, que el nuevo desarrollo urbano ofrecerá puestos de trabajo y oportunidades a los jóvenes. El que esta afirmación sea parcialmente cierta inhibe la expresión del dolor y la ira producidos por la contemplación del desaguado, lo que los hace aún más intensos. En circunstancias así no es ninguna sorpresa que el movimiento ecologista, aunque poderoso, carezca de objetivos definidos. Tiende a lanzar ataques contra blancos tan inapropiados como la industria del fluorocarbono o la caza del zorro, mientras ignora los problemas, potencialmente mucho más serios, planteados por la mayoría de los métodos agrícolas.

Las emociones, intensas pero confusas, provocadas por los peores excesos de Obras Públicas o de la empresa privada, constituyen un rico filón para los manipuladores sin escrúpulos; son fuente de ansiedad, por lo tanto, para gobiernos e industrias responsables. Añadir el muy usado adjetivo "ambiental" a los nombres de departamentos y organismos no parece tener mucho efecto sobre el reflujo, cada vez mayor, de iras y protestas.

Las causas ecológicas se apoyan frecuentemente en argumentos biológicos que, si bien en apariencia tienen una sólida base científica, son de muy poco peso para los científicos. Los ecologistas saben que, hasta ahora, no hay prueba alguna de que las actividades humanas, sean cuales fueran, hayan disminuido la productividad total de la biosfera. Con independencia de los sentimientos de un ecologista como individuo acerca de un problema inminente, está maniatado por la falta de pruebas científicas serias. Todo ello configura un movimiento ecológico dividido, confundido y airado.

Las iglesias y los movimientos humanistas, percibiendo la poderosa carga emocional del movimiento ecologista, han reexaminado creencias y dogmas para asimilarlo en la medida de lo posible. El concepto de los tripulantes cristianos por ejemplo, ha cobrado nuevos bríos: el hombre, si bien sigue aún ejerciendo dominio sobre los peces, las aves y todo el resto de los seres vivos, es responsable ante Dios de la buena administración de la Tierra.

Desde el punto de vista de Gaia, todos los intentos de racionalizar el hecho de una biosfera sometida al hombre, sojuzgada por él, están tan condenados al fracaso como el concepto de colonialismo benevolente. Todos ellos dan por sentado que el hombre es el propietario del planeta o, al menos, su arrendatario. *Animal Farm*, la alegoría orwelliana, cobra un significado más profundo si tenemos en cuenta que, de una forma u otra, todas las sociedades humanas consideran al mundo una granja de su propiedad. La hipótesis de Gaia implica que el estado estable de nuestro planeta incluye al hombre como parte de o socio en una entidad muy democrática.

Entre los diversos conceptos difíciles incorporados a la hipótesis de Gaia está el concepto de inteligencia. Como en el caso de la vida no podemos definirla completamente; hemos de contentarnos con categorizarla. La inteligencia es una característica de los sistemas vivos, y está muy relacionada con la facultad de contestar preguntas correctamente. Podría añadirse que, en especial, las preguntas sobre esas respuestas al medio que afectan la supervivencia del sistema, y la supervivencia de la asociación de sistemas a las que pertenece.

A nivel celular, las decisiones concernientes, por ejemplo, a la comestibilidad de una partícula, a si el entorno es favorable u ofrece riesgos y demás interrogantes de este tipo, son de vital importancia para sobrevivir. Se trata, sin embargo, de procesos automáticos carentes por completo de pensamiento consciente. Gran parte de los ajustes homeostáticos rutinarios, trátase de la célula, el animal, o la biosfera toda, tienen lugar automáticamente, aunque hay que reconocer la necesidad de un cierto grado de inteligencia hasta para un proceso automático: sin ella no podría interpretarse correctamente la información ambiental enviada por los sensores periféricos. El contestar adecuadamente preguntas

sencillas como "¿está demasiado caliente?" o "¿hay aire suficiente para respirar?" requiere inteligencia. Incluso al nivel más rudimentario, el ocupado por el primitivo sistema cibernético discutido en el capítulo 4 cuya función era responder correctamente al sencillo interrogante sobre la temperatura interna del horno, requiere una forma de inteligencia. En realidad, todos los sistemas cibernéticos son inteligentes teniendo en cuenta que todos han de responder correctamente al menos una pregunta. Si Gaia, existe, no hay duda de que, al menos en este limitado sentido, goza de inteligencia.

El espectro de la inteligencia iría de las manifestaciones más rudimentarias —las del ejemplo anterior— a nuestros propios pensamientos, conscientes e inconscientes durante la resolución de un problema difícil. Comentamos brevemente algunos aspectos de la complejidad del sistema regulador de la temperatura corporal en el capítulo 4, aunque nos ocupamos sobre todo de la parte completamente automática, de la parte desprovista de toda acción consciente. Comparado con la termostasis de un horno de cocina, el sistema automático regulador de la temperatura corporal tiene la inteligencia de un genio, pero se halla aún por debajo del nivel consciente; es comparable con el nivel de los mecanismos reguladores que esperaríamos encontrar en Gaia.

En las criaturas que poseen la facultad del pensamiento consciente, del conocimiento, y nadie sabe todavía en qué etapa del desarrollo cerebral se instaura este estado, hay que contar con la posibilidad adicional de la anticipación cognoscitiva. Un árbol se prepara para el invierno desprendiéndose de las hojas y modificando su química interna para que las heladas no lo dañen, todo lo cual se realiza automáticamente, utilizando para ello la información contenida en el código genético del árbol. Por otra parte, si queremos viajar a Nueva Zelanda en julio una de nuestras precauciones más inmediatas sería comprar ropa de abrigo; ello comporta el uso de un tipo de información atesorado por el conjunto de nuestras especies, que está a disposición de cualquiera de nosotros a nivel consciente. Por lo que se sabe, somos las únicas criaturas del planeta con capacidad para reunir y almacenar información, utilizándola después de este modo complejo. Si somos parte de Gaia resulta interesante preguntarse hasta qué punto es también parte de ella nuestra inteligencia colectiva: ¿Constituimos, en cuanto que especie, el sistema nervioso de Gaia, el órgano capaz de anticipar conscientemente los cambios ambientales?

Nos guste o no, estamos empezando a funcionar de esta forma. Piénsese, por ejemplo, en uno de esos miniplanetas, como Icaro, con un diámetro de una milla aproximadamente y una órbita irregular que corta, a la terrestre. Cierta día, los astrónomos nos advierten que uno de estos miniplanetas sigue una trayectoria de choque con la Tierra; el impacto tendrá lugar en pocas semanas. El daño potencial producido por una colisión de esta índole podría ser serio, incluso para Gaia. Es probable que la Tierra haya sufrido en el pasado algún accidente semejante resultando de ello una importante devastación. Nuestra tecnología actual quizá nos permitiera salvarnos y salvar a nuestro planeta. No hay duda alguna de nuestra capacidad de enviar objetos en vastos trayectos

espaciales sirviéndonos del control remoto (de una precisión cercana casi a lo milagroso) para obligarlos a moverse como queremos. Se ha calculado que utilizando cierto número de nuestras bombas de hidrógeno (transportadas en vehículos cohete de gran tamaño) podríamos apartarlo lo suficiente de su trayectoria para transformar un impacto directo en un pasar rozando. Si esto suena a disparate de ciencia ficción, convendría recordar que, casi a diario y desde hace poco menos de cuarenta años, la ciencia ficción de ayer se ha convertido en la historia de hoy.

Bien pudiera ser que en lugar del planeta, lo que se aproximara fuera una glaciación particularmente rigurosa. Vimos en el capítulo 2 que aunque otra edad de hielo pudiera resultarnos desastrosa, tendría una importancia relativa para Gaia. Sin embargo, si aceptamos nuestro papel como parte integrante de Gaia, sus trastornos son los nuestros; la amenaza de la glaciación se convierte en un riesgo compartido. Una posible vía de acción al alcance de nuestra capacidad industrial sería la manufactura de grandes cantidades de fluocarbonos, vertiéndolos luego en la atmósfera. Cuando la concentración en el aire de estas polémicas sustancias pasara de la décima parte por mil millones, la cifra actual, a algunas partes por cada mil millones, se produciría un efecto invernadero similar al del dióxido de carbono que impediría el escape de calor al espacio. Su presencia en la atmósfera podría, pues, alterar completamente el curso normal de la glaciación o por lo menos disminuir en gran medida su importancia. El que los fluorocarbonos causaran algún tipo de alteración temporal en la capa de ozono sería, comparativamente, un problema trivial.

Estos dos casos hipotéticos son sencillamente dos ejemplos de posibles situaciones de emergencia para la Gaia del futuro donde podríamos ser de ayuda. Más importante aún es la implicación del enorme incremento que habría experimentado la percepción de Gaia debido a la evolución del *homo sapiens*, con su inventiva tecnológica y su red de comunicaciones cada día más refinada y compleja. Gaia, a través de la especie humana, está ahora alerta, es consciente de sí misma. Ha contemplado la imagen de su bello rostro a través de los ojos de los astronautas y las cámaras de televisión de los ingenios en órbita. Participa de nuestras sensaciones de placer y asombro, de nuestra capacidad de pensamiento consciente y especulación, de nuestra incansable curiosidad y de nuestro impulso. Esta nueva relación recíproca entre Gaia y el hombre no está, ni mucho menos, establecida del todo: todavía no somos una especie verdaderamente colectiva, verdaderamente parte integral de la biosfera, como lo somos en cuanto que criaturas individuales. Bien pudiera ser que el destino de la humanidad sea transformar la ferocidad, la destrucción y la aidez contenidas en las fuerzas del tribalismo y el nacionalismo, fundiéndolas en una urgencia compulsiva por unirnos a la comunidad de criaturas que constituye Gaia. Puede parecer una rendición, pero tengo la sospecha de que las recompensas (sensaciones de bienestar y plenitud, el sabernos parte dinámica de una entidad mucho más vasta) compensaría con creces la pérdida de la libertad tribal.

Quizá no seamos la primera especie destinada a cumplir tal función, y probablemente no seremos tampoco la última. Los grandes mamíferos marinos, cuyos cerebros son de un tamaño muchas veces superior al de

los nuestros, son otros candidatos. Es un lugar común en biología que la masa de los tejidos no funcionales se reduce durante el transcurso de la evolución: los sistemas que se optimizan a sí mismos eliminan los órganos carentes de función. Parece probable, por consiguiente, que la ballena espermática haga uso inteligente del enorme cerebro que posee, quizá a niveles de pensamiento muy por encima de nuestra comprensión. Es posible, desee luego, que este cerebro apareciera por alguna razón relativamente trivial, para servir, por ejemplo, como mapa multidimensional viviente de los océanos, porque no hay forma más potente de consumir espacio de memorización que el almacenaje de datos ordenados multitudimensionalmente. ¿Será quizá el cerebro de la ballena comparable a la cola del pavo, un deslumbrante órgano de exhibición mental utilizado para atraer a la pareja e incrementar los goces del cortejo? ¿Es la ballena que ofrece juegos más estimulantes la que está en mejor posición para elegir pareja? Sea cual sea la auténtica explicación y la verdadera razón de su existencia, lo que conviene destacar sobre las ballenas y el tamaño de sus cerebros es que los de gran porte son, casi con toda seguridad, versátiles. La causa original de su desarrollo pudo ser todo lo específica que se quiera, pero una vez que aparecen se explotan inevitablemente otras posibilidades. El cerebro humano, por ejemplo, no se desarrolló como resultado de la ventaja selectiva natural de aprobar exámenes, ni tampoco para que pudiéramos realizar ninguna de las gestas memorísticas u otros ejercicios mentales, que la "educación" exige hoy explícitamente.

Como especie colectiva con capacidad para almacenar y procesar información, es probable que hayamos sobrepasado con mucho a las ballenas. Solemos mostrarnos proclives a olvidar, sin embargo, que muy pocos de nosotros seríamos capaces de fabricar una barra de hierro a partir del mineral en bruto y menos aún serían los capaces de construir una bicicleta partiendo del hierro. La ballena quizá posea, como entidad individual, una capacidad de pensamiento cuya complejidad vaya mucho más allá de nuestra comprensión, y puede que entre sus invenciones mentales se cuenten hasta las especificaciones de una bicicleta; pero sin las herramientas, la técnica y el permanente archivo de cornos, la ballena no puede convertir esos pensamientos en objetos.

Aunque no conviene establecer analogías entre los cerebros animales y los computadores siempre es tentador hacerlo. Sucumbamos a la tentación y permitámonos la reflexión de que los humanos diferimos de todas las demás especies animales en la superabundancia de accesorios a cuyo través podemos comunicar y expresar nuestra inteligencia, tanto individual como colectivamente, utilizándola para fabricar máquinas y modificar el entorno. Nuestros cerebros pueden compararse con computadores de tamaño mediano que están directamente conectados entre sí, disponiendo de bancos de memoria y de un surtido casi ilimitado de sensores, instrumentos periféricos y otros ingenios. Por el contrario, los cerebros de las ballenas podrían compararse con un grupo de grandes computadores laxamente conectados entre sí pero casi por completo desprovistos de todo medio de comunicación externa.

¿Qué habríamos pensado de una antigua raza de cazadores, aficionados

sobre todo a la carne de caballo y que, simplemente para satisfacer tal gusto hubiera perseguido y dado muerte sistemáticamente a todos los caballos de la Tierra hasta la completa extinción de la especie? Salvajes, perezosos, estúpidos, egoístas y crueles son algunos de los epítetos que vienen a la mente. ¡Qué derroche cometido por no saber detectar la posibilidad del trabajo asociado entre hombre y caballo! Ya es bastante mala la cría, la explotación que de las ballenas hacen esas naciones cuya industria, atrasada y primitiva, reclama un constante suministro de determinados productos, pero si les damos caza despiadadamente hasta extinguirlas habremos cometido un genocidio del que serán culpables esas burocracias nacionales, indolentes y cerradas, capitalistas o marxistas, desprovistas de corazón o inteligencia para sentir o comprender la magnitud del crimen. Quizá estén todavía a tiempo de enmendar sus errores. Quizá, un día, los niños que compartiremos con Gaia cooperarán pacíficamente con los grandes mamíferos oceánicos utilizando la ballena para que los viajes de la mente adquieran mayor impulso, de igual modo que el caballo nos transportó una vez sobre la superficie de la Tierra.

Definiciones y explicaciones de términos

Abiológico

Literalmente sin vida, aunque en la práctica es un adjetivo de especialistas que describe situaciones en las que la vida no ha tenido parte en el resultado o producto final. Una roca de la superficie lunar ha sido formada y configurada abiológicamente, mientras que casi todas las rocas de la superficie de la Tierra han sido modificadas, en mayor o menor grado, por la presencia de la vida.

Acidez y pH

El uso científico del término ácido describe sustancias prontas a desprenderse de átomos de hidrógeno cargados positivamente, o protones, como los químicos los denominan. La fuerza de una solución acuosa de un ácido viene convenientemente dada en términos de su concentración de protones, que habitualmente va del 0,1 por ciento de los ácidos muy fuertes a la parte por mil millones de un ácido muy débil como el ácido carbónico, el ácido del "agua de soda". Los químicos tienen una extraña manera de expresar la acidez: lo hacen en unidades logarítmicas denominadas pH. Un ácido fuerte tendrá un pH de 1 mientras que el de uso muy débil será de 7.

Aerobio y anaerobia

Literalmente con y sin aire. Son términos utilizados por los biólogos para describir entornos respectivamente abundantes o deficitarios en oxígeno. Todas las superficies en contacto con el aire son aerobias, como la mayoría de los océanos, ríos y lagos, que llevan oxígeno en solución. Los lodos, el suelo y el intestino animal son muy deficitarios en oxígeno, por lo que se los considera anaerobios. En ellos habitan microorganismos semejantes a los que moraban en la superficie de la Tierra antes de que el oxígeno apareciera en la atmósfera.

Estado de equilibrio y de régimen permanente.

Denominaciones técnicas para dos condiciones de estabilidad frecuentes. Una mesa bien apoyada sobre sus cuatro patas está en equilibrio. Un caballo detenido se halla en estado de régimen permanente porque el mantenimiento de su postura se debe a procesos activos, aunque inconscientes. Si el animal muere, se desploma.

Hipótesis de Gaia

Postula que las condiciones físicas y químicas de la superficie de la Tierra, de la atmósfera y de los océanos han sido y son adecuadas para la vida gracias a la presencia misma de la vida, lo que contrasta con la sabiduría convencional según la cual la vida y las condiciones planetarias siguieron caminos separados adaptándose la primera a las segundas.

Homeostasis

Término inventado por un fisiólogo americano, Walter Cannon. Se refiere a esa notable capacidad que poseen los seres vivos para mantener determinados parámetros dentro de márgenes muy estrechos a despecho de los cambios que su entorno pueda experimentar.

Vida

Un estado de la materia que aparece frecuentemente en la superficie y los océanos terrestres. Está compuesta de complejas combinaciones de hidrogeno, carbono, oxígeno, nitrógeno, azufre y fósforo además de muchos otros elementos en cantidades vestigiales. La mayor parte de las formas de vida pueden reconocerse instantáneamente aún sin haberlas vistos antes y son con frecuencia comestibles. La vida, sin embargo, ha resistido hasta ahora todos los intentos de encerrarla en una definición física formal.

Molaridad/Solución molar

Los químicos prefieren expresar la concentración de las soluciones en lo que denominan molaridad porque con ella disponen de término fijo de comparación. Un mol, o molécula-gramo, es el peso molecular de una sustancia expresado en gramos. Una solución molar tiene la concentración de un mol de soluto por litro. Así pues, una solución 0,8 molar de sal común (cloruro sódico) contiene el mismo número de moléculas que una solución 0,8 molar de, pongamos por caso, perclorato de litio, pero como el peso molecular del cloruro de sodio es inferior al del perclorato de litio, la primera de las soluciones contiene el 4,7% de sólidos en peso mientras que este porcentaje se eleva al 10,0 para la segunda, lo que no impide que ambas tengan la misma salinidad y en ambas haya el mismo número de moléculas.

Oxidación y reducción

Para los químicos, son oxidantes aquellos elementos y sustancias deficitarios en electrones cargados negativamente. Oxidantes son el oxígeno, el cloro, los nitratos y muchos otros. Las sustancias ricas en electrones como el hidrógeno, la mayoría de los combustibles y los metales, son denominadas reductoras. Oxidantes y reductores acostumbran a reaccionar con producción de calor: el proceso se llama oxidación. De las cenizas y gases del fuego pueden recuperarse, mediante síntesis química, los elementos originales. Este proceso se llama reducción cuando se parte del dióxido de carbono y se llega al carbono. Las plantas verdes y las algas lo realizan continuamente en presencia de luz solar.

Ozono

Gas azulado, muy venenoso y explosivo. Es una forma rara del oxígeno, caracterizada por tres átomos de oxígeno en lugar de dos. Está presente en el aire que respiramos a concentraciones de 1/30 de parte por millón; en la estratosfera su concentración asciende hasta cinco partes por millón.

Estratosfera

La parte del aire que queda directamente sobre la troposfera. Su

límite inferior es la tropopausa, situada a una altura de entre 7 y 10 millas, y el superior la mesopausa, que se localiza aproximadamente a 40 millas de alto. Estos límites varían con el lugar y la estación y marcan la franja en la cual la temperatura no desciende, sino sube, con la altitud. Es también donde se halla la capa de ozono.

Troposfera

La parte principal (90%) del aire, emplazada entre la superficie terrestre y el límite inferior de la estratosfera, la tropopausa, que empieza entre las 7 y las 10 millas de altura. Es la única región de la atmósfera ocupada por seres vivientes y el lugar donde el tiempo, tal como lo conocemos, se produce.

Sistemas de unidades y medidas

Muchos de nosotros nos vemos obligados a vivir entre dos sistemas de numeración: el viejo sistema natural basado en pies y dedos pulgares, ya moribundo, y el decimal que viene a sustituirle. Las unidades científicas del sistema métrico decimal parecen muy racionales y sensatas, pero sospecho que en muchos casos hay todavía una preferencia más que ligera por la yarda (que puede transformarse en pasos), frente al metro, carente de significado real. Se ha llegado a decir que el sistema métrico decimal fue parte de la guerra psicológica de Napoleón, una especie de terrorismo intelectual destinado a minar las defensas del enemigo. Aún después del siglo y medio, la batalla entre ambos sistemas continúa; aquellos que piensan que el antiguo sistema es simplemente un caprichoso anacronismo británico, harían bien en considerar que en los Estados Unidos aún se mide con pies, libras y galones y que probablemente más de la mitad de la ingeniería y la tecnología de gran calibre mundial utiliza unidades no métricas. Teniendo esto en mente, he utilizado a lo largo del texto el sistema que parecía más apropiado al contexto. Hablar de temperaturas ambientales en grados Celsius es menos comprensible para la mayoría de angloparlantes que hacerlo en grados Fahrenheit. Nadie, sin embargo, piensa en otra cosa que no sean grados Celsius cuando se citan los 5.500 de la temperatura de la superficie solar o los -180 a los que hierve el nitrógeno líquido.

Los tan convenientes prefijos kilo, mega, giga (mil, un millón y mil millones respectivamente) se utilizan para multiplicar unidades tales como toneladas, años y otras. Para cantidades pequeñas se cuenta con los prefijos mili, micro y nano, que indican milésima, millonésima y mil millonésima respectivamente. Se hace uso normal de la notación científica, i.e.: 1.500 millones se expresan como $1,5 \times 10^9$ y tres cienmillonésimas como $3,3 \times 10^{-9}$.

Lecturas adicionales

Capítulo 1

Thomas D. Brock, *Biology of Microorganisms*. Prentice-Hall, New Jersey, 2.^a ed. 1974.

Fred Hoyle, *Astronomy and Cosmology*. W.H. Freeman, San Francisco, 1975.

Lynn Margulis, *Evolution of Cells*. Harvard University Press, 1978. I.G. Gass, P.J. Smith y R.C.L. Wilson (eds.), *Understanding the Earth*. The Artemis Press, Sussex, 1971.

Capítulo 2

A. Lee McAlester, *The History of Life*. Prentice-Hall, N.J., 2^a.ed. 1977. J.C.G. Walker, *Earth History*. Scientific American Books, N.Y., 1978.

Capítulo 3

B.H. Svensson y R. Soderlund, "Nitrogen, Phosphorus and Sulphur. Global Cycles", *Scope Ecological Bulletin*, No 22, 1977.

A.J. Watson, "Consequences for the biosphere of grassland and forest fires". Tesis de la Universidad de Reading, 1978.

Capítulo 4

J. Klir y M. Valach, *Cybernetic Modelling*. Life Books, Londres, 1967.

Douglas S. Riggs, *Control Theory and Physiological Feedback Mechanisms*. Williams & Wilkins, Baltimore, Md; nueva ed. Krieger, N.Y., 1976.

Capítulo 5

Richard M. Goody y James C. Walker, *Atmospheres*. Prentice-Hall (Foundations of Earth Science Series), N.J., 1972.

W. Seiler (ed.), "The Influence of the Biosphere on the Atmosphere", *Pageoph (Pure and Applied Geophysics)*. Birkhauser Verlag, Basle, 1978.

Capítulo 6

G.E. Hutchinson, *A Treatise on Limnology*, 2 vols. Wiley, N. Y. (vol. 1, 1957, nueva ed. 1975; vol. 2, 1967).

Robert M. Garrels and Fred T. Mackenzie, *Evolution of Sedimentary Rocks*. W.W. Norton, N.Y., 1971.

Wallace S. Broecker, *Chemical Oceanography*. Harcourt Brace Jovanovich, N.Y., 1974.

Capítulo 7

Rachel Carson, *Silent Spring*. Houghton Mifflin, Boston, 1962; Hamish Hamilton, Londres, 1963.

K. Mellanby, *Pesticides and Pollution*. Collins (New Naturalist Series), Londres, 1970

National Academy of Sciences, *Halocarbons: Effects on Stratospheric Ozone*. NAS, Washington, D.C., 1976.

Capítulo 8

R.H. Whittaker, *Communities and Ecosystems*. Collier-Macmillan, N.Y., 2.^aed. 1975.

E.O. Wilson, *Sociobiology: The New Synthesis*. Harvard University Press, 1975.

Capítulo 9

Lewis Thomas, *Lives of a Cell: Notes of a Biology Watcher*, Viking Press, N.Y., 1974; Bantam Books, N.Y., 1975.

ARTICULOS CIENTIFICOS SOBRE LA HIPOTESIS DE GAIA

J.E. Lovelock, "Gaia as seen through the atmosphere" *Atmospheric Environment*, 6, 579 (1972).

J.E. Lovelock y Lynn Margulis, "Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis", *Tellus*, 26, 2 (1973).

Lynn Margulis y J.E. Lovelock, "Biological modulation of the Earth atmosphere", *Icarus*, **21**, 471 (1974).

J.E. Lovelock y S.R. Epton, "The Quest for Gaia", *New Scientist*, 6 feb. 1975.
"Thermodynamics and the recognition of alien biospheres", *Adas de la Royal Society de Londres*, B, 189, 30 (1975).

OTROS ARTICULOS RELEVANTES

I. Priogogine, "Irreversibility as a symmetry-breaking process", *Nature*, 246, 67 (1973).

L.G. Sillen, "Regulation of O₂N₂ and CO₂ in the atmosphere: thoughts of a laboratory chemist", *Tellus*, 18, 198 (1968).

E.J. Conway, "The geochemical evolution of the ocean", *Adas de la Royal Irish Academy*, B48, 119 (1942).

C.E. Junge, M. Schidlowski, R. Eichmann, y H. Pietrek, "Model Calculations for the terrestrial carbon cycle", *Journal of Geophysical Research*, 80, 4542 (1975).

Robert M. Garrels, Abraham Lerman, y Fred T. Mackenzie, "Controls of atmospheric O₂ and CO₂ past, present and future", *American Scientist*, 64, 306

(1976).

Ann Sellers y A.J. Meadows, "Longterm variations in the albedo and surface temperature of the Earth", *Nature*, 254, 44 (1975).