



LAS EDADES DE GAIA

Una biografía de nuestro planeta vivo

por

James Lovelock

Título original: "The Ages of Gaia"

(1979)

James Lovelock nació en 1919. Se graduó en 1941 por la Manchester University y se doctoró en medicina en 1948 por la London School Hygiene and Tropical Medicine. Trabajó duran casi 20 años en el National Institute for Medic Research de Londres. En 1961, después de enseñar en las universidades norteamericanas de Yale y Harvard, fue invitado por la NASA para colaborar en el proyecto Surveyor. Fue durante este período, mientras experimentaba una nueva manera de detectar vida, cuando empezó a elaborar su teoría Gaia. Tras abandonar Estados Unidos, se instala como «científico independiente», según su propia expresión, en el campo de Cornualles, en un laboratorio propio, donde sigue investigando patentando inventos y escribiendo libros y trabajos científicos para revistas especializadas.

Gaia, la diosa griega, era la madre tierra para los antiguos. James Lovelock, en cambio, reemplaza aquel mito por la ciencia.

Exponiendo los últimos descubrimientos en geología, química, biología evolutiva y climatología y aportando su propia investigación en este terreno, nos ofrece una nueva síntesis científica en armonía con la concepción griega de que la Tierra es un todo viviente, coherente, autorregulado y autocambiante, una especie de inmenso organismo vivo que se extiende desde el mismo corazón ardiente de la Tierra hasta la atmósfera exterior.

En 1979, Lovelock esbozó por primera vez esta teoría en Gaia: una nueva visión de la Tierra. La polémica enfrentó inmediatamente a los científicos, que tendieron marginarla. Pero, en menos de diez años, se convirtió un tema prioritario entre científicos de distintas disciplinas. En *Las edades de Gaia*, Lovelock pone a punto su teoría y adelanta hipótesis provocadoras. El efecto invernadero, deforestación, las lluvias ácidas, los agujeros en ozonofera, la energía nuclear y la actividad del hombre la biosfera son tan sólo algunos de los conflictos con los que Lovelock se enfrenta en este libro que nos habla de Tierra y de nuestro futuro en ella desde una perspectiva para nosotros, hoy, absolutamente fascinante.

INDICE

1.	Presentación	4
2.	Prefacio	12
3.	Introducción	20
4.	¿Qué es Gaia?	35
5.	Explorando el mundo de las margaritas	65
6.	El Arcaico	94
7.	Las edades medias	132
8.	Tiempos modernos	167
9.	Gaia y el medio ambiente contemporáneo	196
10.	El segundo hogar	230
11.	Dios y Gaia	252
12.	Epílogo	275
13.	Referencias y lecturas adicionales	289



1º

PRESENTACIÓN

“En el momento en que podamos escapar de la superficie de La Tierra y ver todo el planeta desde fuera”, escribió el astrónomo Sir Fred Hoyle en los años cuarenta, “cambiará nuestra concepción del mundo.”

Ese cambio no se haría esperar mucho. Lo que entonces parecía un sueño, más propio de la ficción científica que de la vivencia cotidiana, se hizo realidad en apenas veinte años. El 21 de diciembre de 1968, a bordo de la cápsula Apollo 8, tres astronautas, James A. Lovell, Frank Borman y William Anders, se dirigieron hacia lo que sería el primer vuelo orbital alrededor de la Luna.

Pero mientras sus compañeros tenían puesta su atención en el objetivo, el jefe de la expedición, Lovell, se quedó mirando el punto de partida.

“Lo que mejor recuerdo es lo rápidamente que se encogía la Tierra. De hecho, podías poner tu pulgar en la escotilla y hacerla desaparecer detrás de tu dedo. Ello te indicaba lo poco que somos, porque todo lo que conocíamos, todo lo que amábamos, todas nuestras experiencias y problemas, desaparecían detrás de tu pulgar”

Y al dar la vuelta a la Luna, también por primera vez, Lovell contempló la salida de nuestro planeta e hizo la fotografía más impresionante que jamás se haya tomado: la instantánea de la Tierra colgando en el espacio y emergiendo sobre el horizonte lunar. Esa imagen, como escribió Hoyle, nos ha cambiado para siempre.

Esa vivencia, como dijo Novell,

“nos hace darnos cuenta de lo insignificantes que somos en comparación con la vastedad del universo”.

De una manera comparable, podemos dividir en dos épocas nuestra concepción del mundo vivo y de la Tierra. Antes de James E. Lovelock, nuestro concepto de la vida consistía en individuos, poblaciones o comunidades de seres vivos que residían en un mundo esencialmente estable, de condiciones fisicoquímicas permisivas y determinado solamente por las leyes de la física y de la química.

Un mundo, en fin, que, por reunir ab initio unas condiciones adecuadas, habría permitido que en él se dieran los fenómenos evolutivos de los que nos hablan el registro fósil y la historia geológica del planeta. Después de la revolución lovelockiana, la vida no consiste ya sólo en un grupo de organismos adaptados a su ambiente mediante una relación determinada sólo por las leyes externas.

El ambiente terrestre, en vez de ser un mundo físico regulado por las leyes autónomas propias, es una parte de un sistema evolutivo que contiene la vida y que debe a los fenómenos vitales parte de sus reglas, sus mecanismos y sus componentes. Los seres vivos, conectados entre sí y a la atmósfera, a la hidrosfera y a la litosfera, fabrican y mantienen de continuo su ambiente, formando un todo a nivel planetario. Al contrario de lo que pensábamos antes de Lovelock, no es que las condiciones especiales de la Tierra hayan permitido el desarrollo y evolución de la vida sobre ella (la Tierra), sino que es la vida quien ha determinado el desarrollo y evolución de las condiciones adecuadas para ella (la vida) sobre la Tierra.

Lovelock reconoce algunos de sus predecesores en la idea. Mencionaremos tres. El primero, el geólogo escocés James Hutton (1726-1797), del que hablaremos más adelante. Después, el geólogo austriaco Eduard Suess (1831-1914); a pesar de que no habla frecuentemente de “biosfera” (tres menciones al principio del libro), Lovelock ha desarrollado este concepto a partir de Suess, quien empezó a pensar a un nivel no sólo transnacional sino planetario. Finalmente, el cristalógrafo y proto-ecólogo ruso Vladimir I. Vernadsky (1863-1945), cuyo concepto de vida como “mineral animado” es complementado por la idea de Lovelock de que el ambiente es una parte activa de la vida.

Diversas sustancias minerales (carbonato cálcico, magnetita, sílice, oxígeno y nitrógeno en la atmósfera, óxidos de nitrógeno, etcétera) son consecuencia de la actividad biológica. Diversas mezclas y suspensiones (conservación del nivel de salinidad del mar, composición del aire) se mantienen en un equilibrio inestable, o en franco desequilibrio, gracias a la actividad de los organismos.

Son, además, consecuencia del extraño comportamiento de la vida, que, a diferencia de los seres minerales que la precedieron en la Tierra, crece, se reproduce, incorpora sustancias y devuelve gases.

Como dijo Vernadsky,

“la gravedad hace que las cosas se desplacen hacia abajo, pero la vida las transporta lateralmente, como hace el vuelo de un pájaro o la carrera de un antlope.”

Gracias a Lovelock tenemos una visión nueva de los organismos y de las ciencias de la Tierra y de la vida. Geología, biogeoquímica, microbiología ambiental, evolución, fisiología, ecología son todos aspectos inseparables de la gran búsqueda por conocer el pasado y el presente de la vida en y con nuestro planeta.

La hipótesis (en su primer libro, de 1979), o la teoría (en el que tiene el lector en sus manos) de Gaia, es producto de la imaginación fértil de Lovelock, pero también debe mucho al esfuerzo internacional sobre investigación espacial, principalmente el de la NASA, el único organismo científico que se ha preocupado de estimular (y eso quiere decir subvencionar) un tema tan poco “rentable” como los estudios sobre el origen de la vida.

Desde 1961, en que fue invitado a participar en la construcción de instrumentos para las misiones lunares, hasta la preparación del programa destinado a detectar la posible presencia de vida en Marte, Lovelock fue pensando en la influencia que impondría la vida, de existir, sobre un determinado planeta. Los seres vivos extraterrestres podrían pasar desapercibidos, indetectados, pero sería imposible esconder todos sus efectos sobre un planeta: sus desperdicios en forma sólida, líquida o gaseosa, deberían recorrer la superficie para poder ser reincorporados al ciclo vital.

Si no, en pocos años (cientos o millones no tienen gran significado para el devenir cósmico) se acabarían los materiales necesarios para construir los organismos. Siempre hay indicios químicos de la presencia de vida y, como Lovelock más que nadie ha dicho, estos indicios (como el ruido de ciertas bandas de radio o la iluminación mundial de las ciudades durante la noche) son imprescindibles y detectables en determinados lugares del espectro electromagnético.

Si seguimos las ideas de Lovelock, la búsqueda de vida en otros planetas debería realizarse mediante análisis de los gases de la atmósfera planetaria, que es un método más seguro, más barato y que puede hacerse desde considerable distancia, en vez de mediante ensayos basados en métodos microbiológicos, que son más caros, tienen que hacerse en contacto directo con la superficie del planeta, y que, como ocurrió con el proyecto Viking en 1976, pueden dar resultados falsamente positivos.

Finalmente, una idea derivada directamente de la teoría de Gaia es que la vida de existir, es un fenómeno automantenible de nivel planetario (es decir, en el tiempo y en el espacio).

Una vez establecida firmemente en un planeta, se extenderá por toda su superficie, y solamente desaparecerá cuando el planeta sufra un cambio cósmico trascendental o cuando la fuente original de energía (en nuestro caso, y en el de Marte, una estrella llamada Sol) acabe su existencia actual.

Lovelock, por consiguiente, no sólo aporta Gaia como una teoría aplicable al planeta que le da nombre (Gea y Gaia son la misma palabra el término Gaia se lo sugirió a Lovelock su entonces vecino y después Premio Nobel de Literatura William Golding), sino que proporciona las ideas básicas que han de regir nuestra búsqueda en otros planetas o satélites del sistema solar, en otros sistemas estelares: la vida deja huellas químicas, reutiliza sus productos, tiene ámbito global y se automantiene mientras las condiciones cósmicas se lo permitan.

El trabajo de Lovelock nos sitúa en una revolución científica, o, como definió el médico polaco Ludwik Fleck (1896-1961), en un cambio del “estilo de pensamiento”. Cuando, en 1972, Lovelock

publicó su primer artículo sobre Gaia (*Atmospheric Environment*, 6, 579-580), refiriéndose al planeta Tierra como a un organismo vivo, con capacidad de homeostasis, muchos creyeron que, con esta afirmación, el químico británico intentaba provocar a la comunidad científica o gastar una broma al ciudadano no versado en la materia.

Aún hoy en día, cuando muchas de sus hipótesis han sido confirmadas experimentalmente, hay quien considera paradójico que un científico de la talla de Lovelock -inventor, entre otros aparatos, del sistema captador de electrones, capaz de detectar la presencia de un compuesto químico en cantidades mínimas, y uno de los primeros que llamó la atención sobre el posible efecto perjudicial de los compuestos clorofluorocarbonados liberados a la atmósfera, descubridor de la presencia de sulfuro de dimetilo en los océanos, pionero de los trabajos sobre criobiología, etcétera- se dedique a fomentar ideas más propias del esoterismo que de la ciencia ortodoxa.

También hay quien tilda de teleológica y mística la teoría de Gaia, al presentar una visión panteísta del planeta: “El inconformista y la diosa Tierra” era la traducción del título de un artículo sobre Lovelock, publicado en 1981 por una revista científica de prestigio.

Sin embargo, la idea propuesta por Lovelock no es nueva.

Como él mismo manifiesta en este libro, en 1785 el científico británico James Hutton calificó la Tierra de superorganismo e indicó que debería ser estudiada por la fisiología. Hutton, a quien se considera padre de la geología como disciplina científica, había realizado estudios de medicina y, con la visión que le proporcionaba aquella formación, comparaba el reciclado de nutrientes y elementos en la Tierra con la circulación de la sangre. Más recientemente, en 1925, Alfred Lotka manifestó que la evolución de los organismos tenía que considerarse conjuntamente con la evolución del medio físico en el que vivían.

Algunos de los detractores de Lovelock lo acusan de antidarwinista, cosa que es fácilmente refutable. En efecto, en la teoría de Gaia la evolución de los seres vivos por selección natural desempeña un

papel importante en la autorregulación del planeta; la evolución biológica y la geológica son contempladas como dos procesos íntimamente relacionados. La continuidad misma de la homeostasis de la biosfera no depende de unos organismos concretos sino de la adaptación y la persistencia de las formas más aptas (en sentido darwiniano) para conseguir unas condiciones ambientales favorables para la propia evolución de la vida.

Y esto viene demostrado por el hecho de que desde el establecimiento de los primeros ecosistemas, hace 3.500 millones de años, la vida sobre la Tierra ha dependido mucho más de las relaciones existentes entre los organismos disponibles que de las acciones particulares de unos organismos concretos, lo que viene a decir que las relaciones ecológicas (que son permanentes) predominan sobre los esquemas taxonómicos (que son variables).

En *Las edades de Gaia*, como en los anteriores libros de Lovelock, el gran protagonista es el planeta Tierra. A pesar de que el tema ha sido expuesto por el autor en anteriores ocasiones, los lectores encontrarán en esta obra otro enfoque del mismo. En esta biografía del planeta, el autor narra los cambios que la Tierra ha experimentado en su evolución hasta llegar a la situación actual. El desarrollo industrial, la tecnología, los avances científicos que, por una parte, contribuyen al bienestar de la humanidad, están al mismo tiempo perjudicando el cuerpo planetario que nos alberga. Siguiendo con su analogía (y analogía no implica identificación) con un ser orgánico, Gaia está enferma: el calentamiento por el efecto invernadero es considerado como un acceso febril; la lluvia ácida, un problema digestivo; la disminución de la capa de ozono, una afección dermatológica; el consiguiente aumento de la radiación ultravioleta, un accidente de graves repercusiones.

Gaia (de nuevo la analogía), con su capacidad de homeostasis, puede superar todas esas enfermedades y achaques en un tiempo que, comparado con su longeva edad, no será muy grande. Pero las nuevas condiciones que lleven al equilibrio podrían no ser las adecuadas para la persistencia de la especie humana en el planeta. Lovelock hace una llamada a la sensatez. Si queremos que Gaia siga dándonos cobijo, hemos de curarla de los males que la aquejan.

Lovelock, que, a sus 73 años, lleva una vida retirada en su casa de campo en el condado inglés de Devon, es desde hace casi treinta años un científico independiente. En alguna ocasión, comentando cómo llegó a adoptar esa actitud, Lovelock ha expresado que durante mucho tiempo su principal objetivo fue trabajar como lo hace un pintor o un novelista; es decir, dedicarse a tareas científicas creativas, sin restricciones impuestas por jefes o clientes que normalmente, y a menudo con la mejor intención del mundo, no hacen más que interferir en el trabajo. En su caso, la práctica independiente de la ciencia ha resultado muy fructífera.

El cree que de haber realizado su trabajo en una universidad no habría podido dedicarse a elaborar la teoría de Gaia. Probablemente ningún centro de investigación hubiese pagado un proyecto de ese tipo, por considerarlo demasiado teórico y especulativo.

Las revoluciones científicas, los cambios de “estilo de pensamiento” (Fleck), o de “paradigma” (Kuhn), adolecen de una inicial confusión, entre otras cosas, porque son consideradas desviaciones o herejías de la ciencia anterior establecida. Las nuevas ciencias, en general, suelen tener dificultades para demostrar la conexión entre su teoría y los hechos u observaciones que la hicieron alumbrar.

Así ocurre con Gaia. Pero esta situación no difiere de lo que ha sucedido con otras teorías biológicas novedosas. Así ocurrió también con la “hipótesis” de la evolución por medio de la selección natural, o con la “hipótesis” microbiana de la enfermedad. Darwin o Pasteur tuvieron que enfrentarse a una gran oposición, tratar de demostrar que sus ideas se conformaban perfectamente con las observaciones disponibles, justificar los nuevos descubrimientos que se iban haciendo, explicar en fin cualquier dato previo o contemporáneo con más obligaciones demostrativas que las ideas contrarias imperantes.

Aunque es imposible predecir el curso histórico de cualquier ciencia, podemos aventurar que la teoría de Gaia, como la de la evolución, será pronto una idea incorporada al cuerpo de doctrina científico en general, no sólo por la ausencia o debilidad de explicacio-

nes alternativas, sino por la propia coherencia y capacidad predictiva de la nueva y revolucionaria teoría. Una teoría que se ha hecho doctrina porque ha encontrado su propio Darwin.

Ricard Guerrero
Universidad de Barcelona

Vista desde la Luna, lo que más sorprende de la Tierra, tanto que corta la respiración, es que está viva. Las fotografías muestran la superficie de la Luna seca y molida, muerta como un viejo hueso calcinado. Arriba, flotando libremente dentro de una membrana húmeda y resplandeciente de brillante cielo azul, se encuentra la Tierra naciente, la única cosa exuberante en esta parte del cosmos.

Si pudieran verse con suficiente detalle se verían los torbellinos de las grandes corrientes de nubes blancas, cubriendo y descubriendo grandes masas de tierra. Si se hubiese mirado durante mucho tiempo, a escala geológica, incluso se habrían visto los continentes en movimiento, deslizándose sobre sus placas tectónicas calentadas por el fuego de debajo.

La Tierra tiene el aspecto, organizado y autoestructurado de una criatura viva, llena de información, maravillosamente diestra en manejar la luz solar.

Lewis Thomas,
“La vida de las células

2º

PREFACIO

Estoy escribiendo desde una habitación añadida a lo que una vez fue un molino de agua que sacaba su energía del río Carey en su transcurso hacia el río Tamar y el mar. El molino de Coombe sigue siendo un lugar de trabajo, ahora un laboratorio, un rincón donde paso mucho tiempo. La habitación mira al valle del río con sus campos pequeños y setos típicos del paisaje del condado de Devonshire.

La descripción del sitio en que se escribió este libro es importante para comprenderlo. Trabajo aquí y es mi hogar. No hay otra manera de trabajar acerca de un tema no convencional como Gaia. Las investigaciones y las expediciones para descubrir Gaia me han ocupado cerca de veinte años. Esta actividad me ha compensado por la renta que recibo por la invención y desarrollo de instrumentos científicos.

Agradezco encarecidamente la generosidad de Helen Lovelock por dejarme utilizar la mayor parte de nuestra renta común para el estudio de Gaia y también el papel fiel y coherente de la compañía Hewlett-Packard, que han sido los mejores clientes de mis inventos, y ciertamente han hecho posible la investigación.

Al contrario que otras actividades intelectuales, la ciencia nunca se hace en casa. La ciencia moderna se ha convertido en algo tan profesional como la industria publicitaria. Y, como la industria, se basa en una técnica cara y exquisitamente refinada. No hay sitio para el aficionado en la ciencia moderna. Sin embargo, como sucede corrientemente con las profesiones, la ciencia a menudo aplica su saber a los asuntos triviales en lugar de a los trascendentes. La ciencia se diferencia de otras actividades por su falta de colaboración con individuos independientes. Los pintores, poetas y compo-

sitores se mueven fácilmente desde su propio mundo al de la publicidad y vuelven atrás de nuevo, y ambos mundos se enriquecen.

Sin embargo, ¿qué ocurre con los científicos independientes?

Podría pensarse que el científico académico es tan libre como el artista independiente. Pero de hecho, casi todos los científicos son empleados de una gran organización, como un departamento gubernamental, una universidad o una compañía multinacional. Sólo raramente pueden expresar su saber científico de forma personal. Pueden pensar que son libres, pero casi todos ellos son en realidad empleados, han intercambiado libertad de pensamiento por buenas condiciones de trabajo, un sueldo seguro, pertenencias y una pensión.

También están contritos por una legión de fuerzas burocráticas, desde las agencias de financiación a las organizaciones para la salud y la seguridad. Además de ello, también están encorsetados por las reglas tribales de la disciplina a la que pertenecen. Un físico encontraría muy difícil trabajar en química y un biólogo encontraría la física como algo casi imposible de hacer.

Para limitarlo todo todavía más, en los años recientes la «pureza» de la ciencia se guarda de una manera incluso más celosa mediante una inquisición autoimpuesta basada en la revisión de los colegas. Esta institutriz bien intencionada pero de mente estrecha se asegura de que los científicos trabajen de acuerdo con el criterio convencional y no en la medida que la curiosidad o la inspiración los motiva. Faltos de libertad se encuentran en peligro de sucumbir al examen de trivialidades o de convertirse, como los teólogos medievales, en criaturas del dogma.

Como científico universitario habría encontrado casi imposible dedicarme a tiempo completo a la investigación de la Tierra como planeta vivo. Para empezar no habría financiación para una investigación tan especulativa. Si hubiera continuado con la idea y trabajado en ella durante mis horas de almuerzo y mis ratos libres, no hubiera pasado mucho tiempo sin que recibiese un requerimiento del director del laboratorio.

En su despacho me hubiera avisado de los peligros para mi carrera de continuar en un tema de investigación tan poco de moda. Si ello no fuese suficiente y yo continuase hubiera sido requerido una segunda vez, y me hubieran avisado de que mi trabajo comprometía la reputación del departamento y la propia carrera del director.

Escribí el primer libro de Gaia con la sola ayuda de un diccionario y he decidido escribir éste del mismo modo. Estoy perplejo por la respuesta de algunos de mis colegas científicos que me recriminan por haber presentado un trabajo científico de este modo. Las cosas han tomado un giro extraño en los últimos años, casi se completa el círculo de la famosa lucha de Galileo con los teólogos. Sólo que ahora son los mismos científicos quienes se hacen esotéricos y se convierten en el azote de la herejía.

No fue siempre así. Uno puede preguntarse: ¿Qué fue de los personajes románticos llenos de color, los profesores locos, los doctores No, científicos que parecía que eran libres de recorrer todas las disciplinas de la ciencia sin descanso o impedimento? Todavía existen y de alguna manera estoy escribiendo como un miembro de esta especie rara y en vías de extinción.

Bromas aparte, me he tenido que convertir en un científico radical porque la comunidad científica es refractaria a aceptar teorías nuevas como un hecho. Pasaron unos 150 años antes de que la noción de que el calor es una medida de la velocidad de las moléculas se convirtiese en un hecho para la ciencia, y 40 años antes de que la teoría de placas tectónicas fuese aceptada por la comunidad científica.

Quizás ahora pueda entenderse por qué trabajo en mi casa manteniéndome a mí y mi familia con cualesquiera medios que llegan a mi mano. No es una penitencia sino una deliciosa manera de vivir que los pintores y los novelistas siempre han conocido. Compañeros científicos, uníos a mí. No tenéis nada que perder excepto vuestras becas.

La parte principal de este libro, capítulos 2 a 6, tratan de una nueva teoría de la evolución, una que no niega la gran visión de Darwin pero que contribuye a ella mediante la observación de que la evo-

lución de las especies no es independiente de la evolución de su ambiente material. Ciertamente las especies y su ambiente están imbricadas muy estrechamente y evolucionan como sistemas únicos.

Lo que describiré es la evolución del mayor organismo vivo, Gaia.

Mis primeros pensamientos acerca de Gaia me vinieron cuando estaba trabajando en la división de Norman Horowitz del Jet Propulsion Laboratory, donde se ocupaban de la identificación de vida en otros planetas. Estas ideas preliminares fueron expresadas brevemente en las actas de una reunión celebrada por la Sociedad Americana de Astronáutica en 1968 y de manera más definitiva en una carta enviada a Atmospheric Environment en 1971.

Sin embargo, no fue hasta dos años después, tras una colaboración intensa y fructífera con la bióloga Lynn Margulis, cuando el esqueleto de la hipótesis de Gaia se rellenó de carne y nació a la vida. Los primeros trabajos se publicaron en las revistas Tellus e Icarus, cuyos editores simpatizaban con estas ideas y estaban dispuestos a verlas expuestas.

Lynn Margulis es la más firme y mejor de mis colegas. Soy afortunado porque es una persona única entre los biólogos por su amplitud de ideas acerca del mundo vivo y su ambiente. En un tiempo en que la biología se ha dividido ella misma en unas treinta o más especialidades que están orgullosas de la ignorancia de las otras ciencias, incluso de las otras disciplinas biológicas, necesitaba alguien con la rara capacidad comprensiva de Lynn para establecer un contexto biológico para Gaia.

A veces, cuando hago frente al exceso de entusiasmo acerca de la vida en la Tierra, sigo la guía de Lynn y adopto el papel de administrador de almacén, de representante sindical de los microorganismos y de las formas de vida menores subrepresentadas. Han trabajado para mantener este planeta adecuado para la vida durante 3.500 millones de años. Los rumiantes, las flores salvajes y la gente deben ser reverenciados, pero todos ellos no serían nada si no fuese por la vasta infraestructura de los microbios.

Después de pasar casi veinte años desarrollando una teoría de la Tierra como organismo vivo -en la que la evolución de las especies y su ambiente material están estrechamente relacionados pero que todavía evolucionan por selección natural- sería difícil no adoptar puntos de vista propios sobre los problemas de contaminación y de degradación del medio ambiente natural por los seres humanos.

La teoría de Gaia supone una perspectiva planetaria. Lo que importa es la salud del planeta, no la de algunas especies individuales. Aquí es donde Gaia y los movimientos ecologistas, que en primer lugar están interesados por la salud de la gente, tienen un área común de trabajo. La salud de la Tierra está fundamentalmente amenazada por los cambios a gran escala de los ecosistemas naturales.

La agricultura, la industria forestal y, en menor medida, la pesca aparecen como las causas más importantes de este tipo de daño, junto con el incremento inexorable de los gases responsables del efecto invernadero, dióxido de carbono, metano y otros que se describirán a continuación.

Los geofisiólogos no ignoran el problema de la disminución de la capa de ozono en la estratosfera, con el riesgo asociado de un incremento de radiación ultravioleta, o el de la lluvia ácida. Estos se contemplan como riesgos reales y potencialmente serios, aunque fundamentalmente para la gente y los ecosistemas del Primer Mundo, una región que, desde una perspectiva Gaiana, es claramente desechable. Dicha región estuvo enterrada bajo glaciares, o fue una tundra helada, hace sólo 10.000 años.

Y con respecto a lo que parece ser la preocupación principal, la radiación nuclear, a pesar de lo espantosa que es para los seres humanos, para Gaia se trata de un asunto menor. A muchos lectores les puede parecer que me estoy riendo de esos ecologistas cuya vida de trabajo se dedica a estas amenazas a la vida humana. No es esta mi intención. Sólo quiero hablar en nombre de Gaia porque son muy pocos los que lo hacen en comparación con las multitudes que hablan en favor del hombre.

Debido a esta diferencia de énfasis, la atención al planeta en lugar de a nosotros mismos, me di cuenta de que puede hacer falta una

profesión nueva, la de la medicina planetaria. Estoy en deuda con el historiador Donald McIntyre por indicarme que James Hutton fue quien introdujo primero la idea de una fisiología planetaria en el siglo XVIII. Hutton era médico y geólogo. La fisiología fue la primera ciencia de la medicina, y uno de los objetivos de este libro es establecer la «geofisiología» como base de la medicina planetaria.

En este estadio inicial de nuestra interpretación de la Tierra como una entidad fisiológica, necesitamos generalistas, no especialistas. Somos como los médicos de antes de la utilización de los antibióticos, que, incluso en los años treinta, no podían ofrecer nada más que alivio sintomático a los pacientes que tenían infecciones.

Ahora, la tuberculosis, difteria, tos ferina y neumonía, las causas principales de muerte al principio de este siglo, han disminuido de manera muy apreciable y los médicos están preocupados fundamentalmente por las enfermedades degenerativas -enfermedades cardiovasculares y neoplásicas-. Ciertamente la aparición de los virus HIV ha hecho tambalear la confianza que teníamos en la medicina para curar todas las enfermedades, pero aun así hemos avanzado mucho más allá de los días de impotencia anteriores a 1940.

Con respecto a la salud de la Tierra, ahora nos encontramos en las mismas condiciones en que se encontraban los primeros médicos. Existen especialidades como la biogeoquímica, ecología teórica y biología evolutiva, pero no tienen más que ofrecer al médico ambiental o al paciente que lo que aportaban las ciencias análogas de la bioquímica y la microbiología en el siglo XIX.

Los médicos tienen que hacer el juramento hipocrático para acceder al título. Este incluye el mandato de no hacer nada que pueda dañar al paciente. Se necesita un juramento similar para los putativos doctores planetarios si se tiene que evitar el error iatrogénico: un juramento para prevenir que los superentusiastas apliquen remedios peores que la enfermedad.

Por ejemplo, consideremos un desastre industrial que contamine una región entera con niveles fácilmente medibles de algún agente carcinógeno, uno que represente un riesgo calculado para toda la

población de la región. ¿Sería recomendable destruir todas las cosechas y ganado de la región para prevenir el riesgo asociado a su consumo? En lugar de ello, ¿se debería dejar a la naturaleza que siguiera su curso? ¿o deberíamos considerar alguna opción intermedia menos inflexible?

Un desastre reciente ilustra cómo, en ausencia de un médico planetario, se puede aplicar un tratamiento con consecuencias más rigurosas que el veneno. Me refiero a la tragedia de la Laponia sueca originada por la excitación relacionada con el accidente de Chernobyl. En ella miles de renos, la pieza de caza de los lapones, fueron destruidos porque se creía que eran demasiado radiactivos para comer.

¿Estaba justificado inflingir este tratamiento brutal a una cultura frágil y a su ecosistema dependiente por un problema de envenenamiento radiactivo ligero? ¿O eran las consecuencias de la «curación» peores que el riesgo remoto y teórico de cáncer en una pequeña proporción de sus habitantes?

Además de un capítulo dedicado a estos asuntos ambientales, la última parte de este libro tratará acerca de algunas especulaciones acerca del establecimiento de un sistema geofísico en Marte. El primer libro sobre Gaia también levantó interés acerca de los aspectos religiosos de Gaia, por lo que en otro capítulo he intentado responder a algunas de las cuestiones difíciles que allí se plantearon.

En este terreno poco familiar me he beneficiado del fuerte apoyo moral de la Hermandad Lindisfarne y especialmente de sus fundadores, William Irwin Thompson y James Morton, y de la amistad de sus otros miembros, como Mary Catherine Bateson, John y Nancy Todd y Stewart Brand, quien fue durante muchos años editor de *CoEvolution Quarterly* (revista trimestral sobre coevolución).

Desde los primeros días en que empecé a escribir y a pensar acerca de Gaia he recordado constantemente cuán a menudo se ha planteado la misma idea general. He sentido una simpatía especial por los escritos del ecólogo Eugene Odum.

Pido disculpas si ofendo de manera no intencional a otros «geofisiólogos» por no ser capaz de mencionar sus escritos. Sé que tiene que haber muchos otros pensadores, como el filósofo búlgaro Stephen Zivadin, que han hablado mucho de ello y han sido ignorados.

Me siento afortunado por los amigos que han leído y comentado los capítulos del libro a medida que estaba siendo escrito.

Peter Fellgett, Gail Fleischaker, Robert Garrels, Peter Liss, Andrew Lovelock, Lynn Margulis, Euan Nisbet, Andrew Watson, Peter Westbroek y Michael Whitfield, todos ellos han dado su opinión libre y meditada sobre los aspectos científicos. Estoy igualmente agradecido a mis amigos que han criticado el libro con respecto a su legibilidad: Alex y Joyce Andrew, Stewart Brand, Peter Bunyard, Christine Curthoys, Jane Gifford, Edward Goldsmith, Adam Hart-Davis, Mary McGowan y Elizabeth Sachtouris. Desde 1982, la Universidad de las Naciones Unidas, a través de su responsable de programación, Walter Shearer, me ha proporcionado apoyo moral y material para el desarrollo de la idea de la medicina planetaria.

Abandonado a mí mismo tiendo a escribir bloques de texto que, como partes de un mosaico, sólo tienen sentido vistos desde un alejado punto de vista. Aprecio mucho la amistosa habilidad con que Jackie Wilson ha reordenado mis palabras al corregir el manuscrito y hacerlo legible.

El *Commonwealth Fund Book Program*, con su generosa ayuda, me dio la oportunidad de disponer del tiempo necesario para desarrollar las ideas del libro y de escribirlo. Estoy especialmente agradecido a Lewis Thomas (director del programa) y a las dos revisoras, Helene Friedman y Antonina Bouis por su caluroso estímulo y su ayuda moral.

Sin embargo, este libro nunca se hubiera podido escribir sin el apoyo y amor que entregan tan desinteresadamente Helen y John Lovelock.

3º - INTRODUCCIÓN

Durante toda mi adolescencia tuve la convicción profunda de que yo no era bueno, de que malgastaba mi tiempo arruinando mis talentos, cometiendo desatinos monstruosos y travesuras, y manifestando ingratitud.

Todo ello me parecía inevitable porque vivía entre leyes que eran absolutas, como la ley de la gravedad, que a mí no me es posible cumplir.

George Orwell,
A Collection of Essays

De entre todos los privilegios que se le otorgan a uno cuando sobrevive más de cincuenta años, el mejor es el de la libertad de ser excéntrico. Poder explorar los límites físicos y mentales de la existencia de forma confortable y segura, sin molestarse en considerar si uno parece o suena tonto, da una alegría inmensa. Los jóvenes a menudo se encuentran con que las convenciones son demasiado pesadas para escapar de ellas, excepto cuando forman parte de un culto. Las personas maduras no tienen tiempo para el ocio fuera del que dedican a ganarse la vida. Sólo los viejos pueden tontear alegremente.

La idea de que la Tierra está viva se encuentra fuera de los límites de la credibilidad científica. Empecé a pensar y a escribir sobre ella al llegar a los cincuenta. Era suficientemente viejo como para ser radical sin la mancha culpable de la senilidad. Mi contemporáneo y paisano el novelista William Golding sugirió que cualquier cosa viva merece un nombre. Qué mejor para un planeta vivo que Gaia,

me dijo, el nombre que los griegos usaron para la diosa de la Tierra.

El concepto de que la Tierra es mantenida y regulada de forma activa por la vida de la superficie tuvo sus orígenes en la búsqueda de vida en Marte. Todo empezó una mañana durante la primavera de 1961, cuando el cartero me trajo una carta que estaba tan llena de promesas y excitación como la primera carta de amor. Era una invitación de la NASA para ser un investigador experimental en su primera misión instrumental lunar. La carta era de Abe Silverstein, director de operaciones de los vuelos espaciales de la NASA.

El espacio se encuentra a sólo unos cuantos kilómetros de distancia y es ahora un lugar común. Sin embargo, 1961 se encontraba a sólo cuatro años después del lanzamiento del primer satélite Sputnik. Lo escuché cuando emitía su simple mensaje de bip-bip anunciando que podíamos escapar de la Tierra. Sólo seis meses antes un astrónomo distinguido dijo, cuando se le preguntó si había pensado acerca de la posibilidad de un satélite artificial, que se trataba de una tontería extrema.

Recibir una invitación oficial para unirse a la primera exploración de la Luna era una legitimización y un reconocimiento a mi mundo privado de fantasía. Las lecturas de mi infancia siguieron un camino bien determinado con un inicio en Los cuentos de hadas de los Grimm, el paso a través de Alicia en el país de las maravillas y la llegada a Julio Verne y H.G. Wells. A menudo había dicho en tono de broma que la tarea de los científicos era llevar la ciencia ficción a la práctica.

Alguien lo había oído y se acordó de mi farol.

Mi primer encuentro con la ciencia espacial de la NASA fue la visita a la catedral de la ciencia y la ingeniería, el Jet Propulsion Laboratory, que se encontraba justo en las afueras de Pasadena, en California. Poco después de empezar a trabajar en la sonda lunar fui destinado a la tarea todavía más interesante de diseñar instrumentos sensibles para el análisis de superficies y atmósferas de planetas. Sin embargo, mis conocimientos de base estaban relacionados con la biología y la medicina, y desarrollé un interés crecien-

te acerca de los experimentos que permitiesen detectar vida en otros planetas.

Esperaba encontrar biólogos ocupados en el diseño de experimentos e instrumentos tan maravillosos como la misma nave espacial. La realidad supuso una decepción que marcó el fin de mi euforia. Tuve la impresión de que los experimentos tenían pocas posibilidades de encontrar vida en Marte, incluso en el caso de que en el planeta se encontrase un enjambre de ella.

Cuando una gran organización se enfrenta a un problema difícil, el procedimiento usual consiste en contratar algunos expertos y la NASA lo hizo así. Este sistema es adecuado si lo que se necesita es el diseño de un motor mejor para un cohete. Sin embargo, si el objetivo es la detección de vida, en la Tierra no existen expertos para ello. No había catedráticos especializados en el estudio de vida en Marte, por tanto fue la NASA quien tuvo que determinar quién era experto sobre vida en Marte.

Estos especialistas tendían a ser biólogos familiarizados con el limitado grupo de seres vivos con los que trabajan en sus laboratorios terrestres. No había ninguna razón para suponer que semejantes formas de vida existieran en Marte, incluso en el caso de que la vida estuviese allí muy desarrollada.

Desde el principio al final, los experimentos de detección de vida en Marte tenían un marcado aire de irrealidad. Déjeme ilustrarlo con una fábula. El doctor X, un biólogo eminente, me mostraba su detector de vida marciana, una caja cúbica de acero inoxidable, hermosamente construida, de un centímetro de lado. Cuando le pregunté de qué modo trabajaba me dijo:

«Es un atrapamoscas, las moscas son atraídas por un cebo en su interior y no pueden escapar, espero».

Y cuando pregunté cómo podía estar seguro de que habría moscas en Marte su respuesta fue:

“Marte es el mayor desierto del sistema solar, un planeta lleno de desiertos. En cualquier parte donde haya desierto habrá camellos y no hay animal con tantas moscas como un camello. En Marte mi detector no fallará a la hora de encontrar vida”.

Creo que los demás científicos del Jet Propulsion Laboratory me toleraban como abogado del diablo. Se encontraban bajo una gran presión para cumplir con el trabajo y por tanto tenían poco tiempo para pensar de qué se trataba el trabajo. Contemplaban mis preguntas acerca de las moscas marcianas con divertido escepticismo.

Estaba seguro de que había un sistema mejor.

En aquella época, Dian Hitchcock, una filósofa, visitó el Jet Propulsion Laboratory, donde había sido contratada por la NASA para asesorar sobre la coherencia lógica de los experimentos. Juntos decidimos que la manera más segura de detectar vida en otros planetas sería el análisis de su atmósfera. Publicamos dos trabajos sugiriendo que la vida de un planeta se vería obligada a utilizar la atmósfera y los océanos para el transporte de materias primas y la deposición de los productos de su metabolismo. Ello modificaría la composición química de la atmósfera hasta convertirla en algo claramente diferente de la atmósfera de un planeta sin vida.

El módulo de aterrizaje del Viking podría no haber encontrado vida incluso en la Tierra si hubiese aterrizado en el hielo antártico. Por el contrario, un análisis atmosférico pleno para el que el Viking no estaba equipado, hubiera proporcionado una respuesta clara. Ciertamente, incluso en los años sesenta, existían análisis de la atmósfera marciana realizados con telescopios de infrarrojos. Estos demostraban que la atmósfera estaba dominada por dióxido de carbono y que se encontraba cerca del equilibrio químico. Por el contrario, los gases de la atmósfera terrestre se encuentran en un permanente estado de desequilibrio. Eso nos sugería de manera aplastante que Marte no tenía vida.

Esta conclusión no era popular entre nuestros patrocinadores en la NASA.

De cualquier modo tenían que encontrar argumentos que apoyasen el coste de la expedición a Marte y ¿qué objetivo podía ser más interesante que el descubrimiento de vida allí?

Un tal senador Proxmire, firme guardián de la hacienda pública, había aguzado los oídos al saber que la NASA estaba insistiendo en un aterrizaje en Marte, con grandes gastos, incluso cuando algunos

científicos dentro de la organización habían dicho que no se podía encontrar ninguna vida. Dicho senador se podría haber sentido muy molesto si hubiera descubierto que en nuestra investigación, pagada con los fondos de la NASA, Hitchcock y yo habíamos orientado nuestro telescopio hacia nuestro propio planeta para mostrar que la Tierra contenía vida en abundancia.

Durante aquellos días apasionantes a menudo argumentábamos acerca de qué tipo de vida podía existir en Marte y acerca de la extensión superficial que podía cubrir. A finales de los sesenta la NASA envió su nave Mariner para contemplar la superficie desde una órbita alrededor del planeta. El paisaje observado mostró que Marte, como la Luna, tenía una superficie llena de cráteres y tendía a confirmar la predicción decepcionante que habíamos hecho Dian Hitchcock y yo a partir del estudio de su composición atmosférica, según la cual probablemente no contenía vida.

Recuerdo la amable discusión con Carl Sagan, quien pensaba que todavía era posible que existiese vida en algunos oasis en los que las condiciones locales fuesen más favorables. Mucho antes de que el Viking partiese de la Tierra yo intuía que la vida en un planeta no podía existir de modo disperso. No podría mantenerse en unos pocos oasis, excepto al principio y al final de su existencia. A medida que desarrollaba la teoría de Gaia esta intuición crecía y ahora la contemplo como un hecho.

Existía una gran polémica acerca de la necesidad de esterilizar la nave espacial antes de enviarla a Marte. Nunca pude entender por qué debía considerarse tan negativamente correr el riesgo de sembrar artificialmente Marte de vida; incluso podía significar la única posibilidad de, transmitir vida a otro planeta. A veces la discusión era intensa y arrogante, llena de orgullo adolescente.

En cualquier caso, sintiendo como sentía que Marte estaba muerto, no se podía establecer una analogía entre esta siembra y una violación, tal como a veces se planteaba. Como mucho, el acto hubiera consistido sólo en la lúgubre y solitaria aberración de la necrofilia. Bromas aparte, como diseñador de instrumentos sabía que el acto de esterilización complicaba sobremanera la tarea ya excesiva de

construir el Viking y amenazaba la integridad de su homeostasis interna finamente diseñada.

Hasta hoy he apreciado la tolerancia y la generosidad de mis colegas en el Jet Propulsion Laboratory y en la NASA, especialmente la amabilidad personal de Norman Horowitz, quien entonces era el jefe del equipo de biólogos espaciales. A pesar de los «malos augurios» que les había traído, continuaron apoyando mis investigaciones hasta que las misiones Viking a Marte estaban listas para partir.

El aterrizaje suave en Marte en 1975 de estos dos robots intrincados y casi humanamente inteligentes fue un éxito. Su misión era encontrar vida en Marte, pero los mensajes que enviaron en forma de señales de radio sólo consistían en las frías noticias de su ausencia. Marte, excepto en los días de verano, era un sitio de implacable frigidez, e implacablemente hostil a la cálida y húmeda vida de la Tierra. Los Viking ahora están allí meditando silenciosamente, sin poder ya transmitir información desde el planeta, impelidos hacia su destrucción final por el viento con su carga abrasiva de polvo y ácido corrosivo. Hemos aceptado que el Sistema Solar es yermo.

La búsqueda de vida en el espacio exterior ya no es un objetivo científico urgente, pero la confirmación por el Viking de la extrema esterilidad de Marte ha establecido un negro telón de fondo que contrasta con los nuevos modelos e imágenes de la Tierra. Ahora nos damos cuenta de que nuestro planeta es muy diferente de sus dos homónimos muertos, Marte y Venus.

Así es como empezó la hipótesis de Gaia.

Mirábamos hacia la Tierra desde nuestra imaginación y por tanto con ojos inexpertos, y encontramos muchas cosas, incluyendo la radiación emitida desde la Tierra de una señal infrarroja característica de la anómala composición química de su atmósfera. Esta canción incesante de vida es audible para cualquiera que tenga un receptor, incluso fuera del Sistema Solar. En los capítulos sucesivos intentaré mostrar que, excepto cuando la vida se hace cargo de su planeta y lo ocupa de manera extensiva, no se cumplen las condiciones necesarias para su persistencia. La vida planetaria tiene que ser capaz de regular su clima y estado químico.

Períodos parciales, ocupación incompleta o visitas ocasionales no son suficientes para vencer las fuerzas ineludibles que gobiernan la química y física de un planeta. El ejercicio imaginario de sembrar Marte con vida, o incluso de llevar vida a Marte, se describe en el capítulo 8. Este trata acerca del esfuerzo necesario para llevar Marte a un estado adecuado para la vida y mantenerlo en tal estado hasta que la vida se haga cargo.

Lo que permite ilustrar hasta qué asombroso punto la mayor parte de nuestro medio ambiente en la Tierra se mantiene siempre en un estado perfecto y confortable para la vida. La energía del Sol está tan bien distribuida que la regulación no representa efectivamente ningún gasto.

La hipótesis de Gaia supone que la Tierra está viva y considera los datos que existen a favor y en contra de esta suposición. La presenté por primera vez a mis colegas científicos en 1972 en forma de una nota titulada «Gaia vista desde la atmósfera».

Era un escrito breve, que sólo ocupaba una página de la revista *Atmospheric Environment*. Los datos que la apoyaban se habían obtenido principalmente a partir de la composición atmosférica de la Tierra y su estado de desequilibrio químico. Estos se resumen en la tabla 1.1 donde se comparan con la composición actual de las atmósferas de Marte y Venus, y con la hipótesis de cuál sería ahora la atmósfera de la Tierra si nunca hubiera tenido vida. Después de largas e intensas discusiones, Lynn Margulis y yo publicamos unos argumentos más detallados y concisos en las revistas *Tellus* e *Icarus*.

Luego, en 1979, Oxford University Press publicó mi libro: “*Gaia: Una nueva visión de la vida sobre la Tierra*”, que recogió todas las ideas desarrolladas por nosotros hasta aquel momento. Empecé a escribir este libro en 1976, cuando las naves Viking de la NASA estaban a punto de aterrizar en Marte. Utilicé su presencia allí como exploradores planetarios para establecer el escenario para el descubrimiento de Gaia, el organismo vivo más grande del Sistema Solar.

Han pasado diez años y ha llegado el tiempo de escribir de nuevo, esta vez describiendo Gaia y descubriendo de qué tipo de vida se trata. La manera más simple de explorar Gaia es a pie. ¿Qué otra manera hay más fácil de ser una parte de su ambiente? ¿De qué otra manera se la puede conocer con todos los sentidos?

Por ello, hace algunos años me gustaba leer acerca de otro hombre que gozaba de pasear por el campo y que también creía que la Tierra estaba viva.

Tabla 1.1. ATMOSFERAS PLANETARIAS: SU COMPOSICION

Gas	Planeta			
	Venus	Tierra sin vida	Marte	Tierra tal cual es
Dióxido de carbono	96,5 %	98 %	95 %	0,03 %
Nitrógeno	3,5 %	1,9 %	2,7 %	79 %
Oxígeno	trazas	0,0 %	0,13 %	21 %
Argón	70 ppm	0,1 %	1,6 %	1 %
Metano	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,7 %
Temperaturas superficiales °C	459	240 a 340	-53	13
Presión total, bars	90	60	0,0064	1,0

Yevgraf Maksimovich Korolenko vivió hace 100 años en Kharkov, Ucrania.

Era un científico independiente y un filósofo. También se encontraba en los sesenta cuando empezó a expresar y discutir ideas que eran demasiado radicales para los que sólo eran hombres maduros.

Korolenko era un hombre instruido; aunque se había educado a sí mismo conocía los trabajos de los grandes naturalistas de su tiempo. No reconocía ninguna autoridad, filosófica, religiosa o científica sino que intentaba encontrar repuestas por sí mismo. Uno de aquellos con los que compartió sus paseos por el campo y sus ideas radicales era su joven primo, Vladimir Vernadsky.

Este, que se convertiría en un eminente científico soviético, estaba profundamente impresionado por la afirmación del anciano de que «la Tierra es un organismo vivo». Sin embargo, para el biógrafo de Vernadsky, R.K. Balandin, éste

«es otro de los aforismos de Korolenko. És dudoso que el joven Vladimir Vernadsky hubiera recordado este aforismo media centuria después. Sin embargo, la ingenua analogía de Korolenko de la Tierra como un organismo vivo no pudo despertar otra cosa que el interés de su joven amigo».

La idea de que la Tierra está viva probablemente es tan antigua como la humanidad. Sin embargo, la primera expresión de ello como un hecho científico fue impartida por el científico escocés James Hutton. En 1785 dijo, en una reunión de la Royal Society de Edimburgo, que la Tierra era un superorganismo y que su disciplina de estudio apropiada tendría que ser la fisiología. Continuó su discurso comparando los ciclos de los elementos nutrientes en el suelo y el movimiento del agua de los océanos hacia la tierra con la circulación de la sangre.

James Hutton es recordado con justicia como el padre de la geología, pero su idea de que la Tierra estaba viva cayó en el olvido. Dentro de la profunda corriente reduccionista del siglo XIX esta idea fue incluso rechazada, excepto en las mentes de filósofos aislados como Korolenko.

Hoy en día todavía utilizamos la palabra “biosfera” reconociendo raramente que fue Eduard Suess quien en 1875 utilizó primero el término de forma circunstancial, cuando redactaba su trabajo sobre la estructura geológica de los Alpes. Vernadsky desarrolló la idea y desde 1911 la utilizó con su significado actual.

Vernadsky decía:

“La biosfera es la cubierta de la vida, es decir, el área ocupada por la materia viva... se puede contemplar la biosfera como el área de la corteza terrestre ocupada por organismos transformadores que convierten las radiaciones cósmicas en energía terrestre efectiva: eléctrica, química, mecánica, térmica, etcétera”.

Cuando formulé la primera hipótesis de Gaia ignoraba completamente las ideas de estos científicos anteriores, especialmente Hutton, Korolenko y Vernadsky. También desconocía las ideas similares al respecto expresadas en los últimos años por muchos científicos tales como Alfred Lotka, el fundador de la biología de poblaciones, Arthur Redfield, un oceanógrafo químico, y J.Z. Young, un biólogo.

Sólo agradecía la inspiración de G.E. Hutchinson, un limnólogo distinguido de la Universidad de Yale, y de Lars Sillén, un geoquímico sueco. Sin embargo no me encontraba solo en mi ignorancia. Entre las vigorosas objeciones o apoyos a la idea de Gaia provenientes de mis colegas de todos los campos científicos, nadie observó que lo que se había dicho era una continuación natural de la visión del mundo de Vernadsky.

Incluso en fechas tan posteriores como las de 1983, la obra monumental *Earth's Earliest Biosphere* [La biosfera más antigua de la Tierra], editada por el geólogo J.W. Schopf, que incluía contribuciones de veinte de los especialistas en ciencias de la Tierra americanos y europeos más importantes, no hizo mención de Hutton ni de Vernadsky.

La sordera, demasiado común, de los angloparlantes a cualquier otra lengua mantuvo fuera de nuestro conocimiento la ciencia cotidiana del mundo ruso-hablante. Sería fácil atribuir la poca consideración a las contribuciones de Vernadsky a las divisiones políticas actuales. Sin embargo, aunque algo puede haber de ello, creo que se trata de un aspecto menor en comparación con los efectos malignos de la separación de la ciencia en compartimentos definidos en el siglo XIX, compartimentos en los que especialistas y expertos pudieran ejercer sus profesiones sin complicaciones.

¿Cuántos físicos se encuentran satisfechos de su ignorancia de lo que llaman las «ciencias blandas»? ¿Cuántos bioquímicos pueden nombrar las flores silvestres de su región?

En semejante clima de opinión no es extraño que el biógrafo de Vernadsky encontrase la frase de Korolenko, «la Tierra es un organismo vivo», como algo ingenuo. La mayoría de científicos del

mundo actual estarían de acuerdo con Baladin. Sin embargo, pocos serían capaces de ofrecer una definición satisfactoria de la vida como entidad o como proceso.

En ciencia, una hipótesis no es nada más que un «supongamos».

El primer libro sobre Gaia era hipotético y estaba escrito rápidamente: un tosco esbozo a lápiz que intentaba proporcionar una visión de la Tierra desde una perspectiva diferente. Las críticas más clarividentes a este libro dieron lugar a intuiciones nuevas y más profundas sobre Gaia. Desde un punto de vista fisiológico la Tierra estaba viva. Se han acumulado nuevas evidencias y he realizado nuevos modelos teóricos. Ahora pueden describirse algunos de los detalles más concretos, aunque por fortuna parece que no es muy necesario borrar las líneas originales.

Como consecuencia, este segundo libro es un manifiesto de la teoría de Gaia, la base de un punto de vista nuevo y unificado de las ciencias de la Tierra y de la vida. Debido a que Gaia se ve desde fuera como un sistema fisiológico he llamado geofisiología a la ciencia de Gaia.

¿Por qué desarrollamos las ciencias de la Tierra y de la vida de forma conjunta? Más bien tendría que preguntar: ¿Por qué han sido separadas por una disección inmisericorde en disciplinas distintas y aisladas?

Los geólogos han tratado de convencernos de que la Tierra sólo es una bola de roca mojada por los océanos; que nada, excepto una tenue capa de aire, la aísla del duro vacío del espacio, y que la vida simplemente es un accidente, un pasajero tranquilo que ha subido en autostop para realizar un trayecto en la bola de roca a lo largo de su viaje a través del espacio y del tiempo.

Han afirmado que los organismos vivos son tan adaptables que se han ajustado a todos los cambios materiales que han ocurrido durante la historia de la Tierra. Sin embargo, supongamos que la Tierra está viva. Entonces no hace falta contemplar la evolución de las rocas y de las cosas vivas como ciencias separadas para su estudio en edificios separados de la universidad. En su lugar, una ciencia evolutiva describe la historia del planeta entero. La evolución de

las especies y la evolución del medio ambiente están fuertemente acopladas en un proceso singular e inseparable.

La ciencia no está excesivamente preocupada con que las cosas sean verdaderas o falsas. La ciencia en la práctica consiste en ensayar suposiciones, caminando indefinidamente en torno a ellas y hacia la absoluta e inalcanzable verdad. Para los científicos Gaia es una conjetura nueva que ha sido presentada para su evaluación, o un nuevo «bioscopio» mediante el cual observar la vida en la Tierra.

Para algunas ciencias las ideas gaianas son adecuadas, incluso cuando no son bienvenidas, porque la visión del mundo a través de viejas teorías ya no es definida y clara. Ello es especialmente cierto para la ecología teórica, la biología evolutiva y, en general, las ciencias de la Tierra.

Durante cuarenta años, los ecólogos teóricos -desde que Alfred Lotka y Vito Volterra hicieron sus modelos simples de un mundo poblado únicamente por conejos y zorros- han intentado comprender las interacciones complejas que hay entre un bosque real y su amplia diversidad de especies. Sus modelos matemáticos, aunque son buenos en casos de patologías interesantes, fallan en la explicación de la gran estabilidad a largo plazo de los ecosistemas complejos de las selvas tropicales. Parece que sus modelos van contra la intuición, pues sugieren que la fragilidad de los ecosistemas aumenta con su diversidad.

Plantean que el granjero que rota sus cultivos y que mantiene sus setos y zonas arboladas no sólo es menos eficiente sino menos estable, desde un punto de vista ecológico, que el granjero que explota un monocultivo.

Recientemente, los biólogos evolucionistas se han enzarzado en una fuerte discusión. Las páginas usualmente plácidas de las revistas *Nature* y *Science* han ardido como una manzana de casas, pues los defensores conservadores del cambio gradual y ordenado han reaccionado contra una revolución por el derecho a interpretar las grandes ideas de Darwin.

La evolución, ¿fue gradual o transcurrió, como proponen Stephen Jay Gould y Niles Eldredge, mediante períodos largos de estabilidad interrumpidos por cambios catastróficos?

Los geólogos interesados en la evolución de las rocas, océano y atmósfera empiezan a considerar el por qué de la persistencia de los océanos en la Tierra cuando Marte y Venus son tan secos. Por otra parte, existe la perplejidad de la constancia del clima a pesar del incremento siempre uniforme del calor radiado por el Sol.

Estos y otros aspectos que parecen oscuros dentro de campos separados de la ciencia se convierten en claros cuando se consideran como fenómenos de un planeta vivo. La teoría de Gaia predice que el clima y la composición química de la Tierra se conservan homeostáticamente durante largos períodos hasta que algún conflicto interior o fuerza externa provoca un salto a un nuevo estado estacionario. Veremos que la evolución a saltos y la presencia de abundantes océanos son de esperar en un planeta de estas características.

Como teoría de una Tierra viva, este libro no es ni holístico ni reduccionista. No hay secciones de climatología, geoquímica, etcétera. Los dos próximos capítulos son una descripción de la teoría de Gaia. Luego siguen tres capítulos que exponen el punto de vista del geofisiólogo sobre la historia de la Tierra, desde el origen de la vida hasta el tiempo presente.

Estos se siguen cronológicamente; en lugar de pasar de un modo caótico de una disciplina científica a otra. La secuencia empieza con el comienzo de la vida, el Arcaico, cuando los únicos organismos de la Tierra eran las bacterias, y cuando la atmósfera estaba dominada por metano y el oxígeno sólo era un gas traza. Después sigue la edad intermedia, que los geólogos llaman Proterozoico, desde la aparición por primera vez del oxígeno como gas atmosférico dominante hasta el tiempo en que las comunidades celulares se agruparon para formar colectivos nuevos, cada uno con su identidad propia.

Luego sigue un capítulo acerca del Fanerozoico, el tiempo de las plantas y los animales. en cada uno de ellos se interpreta el registro

geológico a través de la teoría de Gaia y se comparan las nuevas interpretaciones con el criterio convencional de las ciencias de la Tierra y de la vida. Los capítulos finales se refieren al presente y futuro de Gaia, haciendo énfasis en la presencia humana tanto en la Tierra como quizá puede existir algún día en Marte.

¿Qué representaría llevar vida a Marte?

Incluso una división cronológica implica una arbitrariedad que es subrayada por la persistencia del biota del Arcaico; su mundo nunca se extinguió del todo, sino que vive aún en nuestros intestinos. Aquellas bacterias han estado con Gaia durante casi cuatro mil millones de años, y todavía viven en todas las partes de la Tierra, en fangos, sedimentos e intestinos, en cualquier parte en que se puedan mantener lejos de su veneno mortal, el oxígeno.

Cualquier teoría nueva sobre la Tierra no puede mantenerse como un secreto de la ciencia. Está destinada a atraer la atención de humanistas, medioambientalistas, y de aquellos con creencias y convicciones religiosas. La teoría de Gaia desentona tanto con el amplio mundo humanista como con la ciencia establecida. En Gaia sólo somos otra especie, no los propietarios ni los administradores del planeta. En gran parte, nuestro futuro depende mucho más de una relación correcta con Gaia que con el inacabable drama del interés humano.

Cuando nuestra familia vivía en el pueblo de Bowerchalke, en Wiltshire, Helen y yo pasábamos las mañanas de primavera buscando especies raras de orquídeas salvajes. En aquellos días, antes de su destrucción por los vándalos del negocio agrícola, la campiña inglesa era un jardín celestial. Las orquídeas crecían con profusión en los prados, pero las especies más raras podían ser increíblemente difíciles de encontrar. Se necesitaba una gran preparación mental previa para encontrar una orquídea perfumada en la hierba.

Era un pasatiempo esotérico. Mucha ciencia se hace de esta manera; puede ser divertido descubrir compuestos nuevos o antiguos, o conceptos matemáticos, en sitios extraños. Sin embargo, estos descubrimientos generalmente requieren una preparación mental y física y, a menudo, el aprendizaje de un lenguaje nuevo.

La teoría de Gaia se remonta a los fundamentos, a la génesis. Incluso la geofisiología es una ciencia demasiado nueva como para tener un lenguaje. Por tanto este primer libro se ha escrito como el primero, de manera que cualquier interesado en la idea de que la Tierra está viva pueda leerlo. No es ni un libro de texto ni el manual de trabajo de un ingeniero planetario; es el punto de vista de un hombre acerca del planeta al que pertenecemos. Una buena parte de este libro está dedicada a mi entretenimiento y al de los lectores.

Se escribió como parte de un estilo de vida que reserva su tiempo para ir de paseo por el campo y para hablar con los amigos, como hizo Korolenko, acerca de que la Tierra está viva.

4°

¿QUE ES GAIA?

“No debes [...] ser demasiado preciso o determinista cuando se trata de pájaros, árboles y flores.”

Walt Whitman
(Specimen Days)

Viaja atrás en tu memoria, al instante en que despertaste por primera vez, aquel momento exquisito de tu infancia en que conociste la vida. El ímpetu inmediato de la luz y el sonido, como si se hubiese encendido un televisor que fuera a traer noticias de gran importancia. A mí me parece recordar la luz del sol y el aire fresco y suave; entonces, de pronto comprendí quién era y lo bueno que era estar vivo.

Rememorar el primer recuerdo de mi vida personal puede parecer irrelevante en nuestra búsqueda de Gaia, pero no lo es. Como científico observo, mido, analizo y describo fenómenos. Antes de que pueda hacer estas cosas necesito saber qué es lo que estoy observando. En un sentido amplio puede parecer innecesario reconocer un fenómeno cuando se observa, pero los científicos casi siempre tienen nociones preconcebidas acerca del objeto de estudio.

Como niño yo reconocí la vida de manera intuitiva. Como adulto que se pregunta acerca de la extraña atmósfera de la Tierra una mezcla de gases incompatibles, tales como el oxígeno y el metano coexistiendo como zorros y conejos en la misma madriguera-, me sentía obligado a reconocer la existencia de Gaia, a intuir su existencia, mucho antes de que pudiera describirla en términos científicos adecuados.

El concepto de Gaia está enteramente relacionado con el concepto de vida. Por tanto, para comprender lo que es Gaia primero necesito explorar este concepto difícil, la vida. Detestan admitirlo, pero los estudiosos de la vida, sean los naturalistas del siglo XIX o los biólogos del siglo XX, no pueden explicar lo que es la vida en términos científicos.

Todos saben lo que es, tal como todos lo sabemos desde la infancia, pero desde mi punto de vista no ha habido ninguno capaz de definir lo que es la vida. La idea de vida, el sentido de estar vivo, es uno de los conceptos más familiares y más difíciles de entender que podemos encontrar. Durante mucho tiempo he llegado a pensar que la respuesta a la pregunta «¿qué es la vida?» se juzgó tan importante para nuestra supervivencia que fue clasificada top secret y encerrada, en forma de instinto, en los niveles inconscientes de la mente.

A lo largo de la evolución existía una gran presión evolutiva para la acción inmediata: el aspecto crucial de nuestra supervivencia consistía en la distinción instantánea entre un predador y una presa, un familiar y un enemigo, y el reconocimiento de una pareja potencial. No podíamos permitirnos retraso en el pensamiento consciente o debates en los comités de la mente. Debíamos computar los imperativos del reconocimiento a la velocidad más rápida y, por tanto, en los rincones primariamente evolucionados y más inconscientes de la mente.

Esta es la razón por la que conocemos de manera intuitiva lo que es la vida. Es comestible, simpática y mortal.

Considerar la vida como un objeto científico que requiere una definición precisa es mucho más difícil. Incluso los científicos, que son personas conocidas por su descarada curiosidad, se esconden cuando tienen que definir lo que es la vida. Todas las ramas de las ciencias biológicas clásicas parecen eludir la cuestión.

En el Dictionary of Biology elaborado por M. Abercrombie, C. Hickman y M.L. Johnson, estos tres distinguidos biólogos definen de manera sucinta todo tipo de palabras, como ontogenia (desarrollo),

pteridofita (helechos) y ecdisis (una etapa en el desarrollo de los insectos).

Bajo la letra L se encuentra leptoteno (el primer signo del acoplamiento de cromosomas en la meiosis) y limnología (el estudio de los lagos), pero no se menciona la vida (life) en ningún sitio. Cuando aparece la palabra vida en biología se define por negación, tal como publicó en 1937 el biólogo amante de la filosofía. N.W. Pirie; en un artículo titulado «The Meaninglessness of the Terms "Life" and "Living"» [La falta de sentido de los términos «vida» y «vivo»].

Los diccionarios Webster y Oxford no ofrecen mayor ayuda. Ambos recuerdan el origen anglosajón de la palabra life a partir de lif. Ello puede explicar el disgusto de los biólogos académicos para abordar un concepto tan elemental como el de la vida. Las guerras tribales entre normandos y sajones duraron mucho tiempo; los maestros medievales, conociendo cuál era el legado más potente y de mayor preferencia, decidieron apoyar la victoriosa clase dirigente normanda y elegir el latín como lengua. La vida era otro de esos conceptos rudos e incivilizados de las palabras anglosajonas, que era mejor evitar cuando uno se encuentra en buena compañía.

La palabra latina equivalente a lif, anima, ofrecía incluso una ayuda menor. Era parecida a otra palabra gótica de cuatro letras (soul), alma.

Volviendo al diccionario Webster, éste define la vida como:

“Aquella propiedad de las plantas y animales (que acaba con la muerte y les distingue de la materia inorgánica) que les permite comer, obtener energía de los alimentos, crecer, etcétera”

El diccionario Oxford dice algo parecido:

“La propiedad que diferencia un animal o planta vivos, o una parte viva de un tejido orgánico, de la muerte o de la materia no viva; el conjunto de actividades funcionales mediante las cuales se manifiesta dicha propiedad”.

Si estas definiciones claramente inadecuadas del concepto vida son todo lo que disponemos para trabajar, ¿podré hacerlo mejor para

definir el organismo vivo Gaia? Me ha resultado muy dificultoso, pero si tengo que hablar de ello debo intentarlo.

Puedo empezar por algunas definiciones y clasificaciones simples. Los seres vivos, como los árboles y los caballos e incluso las bacterias, pueden ser identificados fácilmente porque están ligados por paredes, membranas, piel o cubiertas céricas. Utilizando energía, directamente del Sol e indirectamente de los alimentos, los sistemas vivos actúan incesantemente para mantener su identidad, su integridad. Incluso cuando crecen y cambian y se reproducen, no dejamos de reconocerlos como entidades visibles y reconocibles.

Aunque existen incontables millones de organismos individuales, todos viviendo y cambiando, sus rasgos comunes nos permiten agruparlos y reconocer que pertenecen a especies tales como pavos reales, perros o trigo. Se estima que existen unos diez millones de especies. Cuando cualquier individuo falla en obtener energía y alimento, falla en mantener su identidad, nos damos cuenta que está agonizando o muerto.

Un paso importante en nuestro conocimiento consiste en darse cuenta de la importancia de los conjuntos de cosas vivas. Tú y yo estamos compuestos de una colección de órganos y tejidos. Los abundantes beneficiarios de los trasplantes de corazón, hígado y riñones son un testimonio elocuente de que cada uno de estos órganos puede existir independientemente del cuerpo cuando se les mantiene calientes y se les proporcionan nutrientes.

Los mismos órganos están constituidos por miles de millones de células vivas, cada una de las cuales también puede vivir de forma independiente. Incluso las mismas células, como demostró Lynn Margulis, son comunidades de microorganismos que una vez vivieron libremente. Las entidades de transformación de energía de las células animales (las mitocondrias) y de las plantas (las mitocondrias y los cloroplastos) una vez fueron bacterias que vivían independientemente.

La vida es social. Existe en comunidades y colectivos. Existe una palabra útil en física para describir las propiedades de los conjuntos: coligativo. Es necesaria porque no hay manera de medir o ex-

presar la temperatura o la presión de una molécula individual. Los físicos dicen que temperatura y presión son propiedades coligativas de un número suficiente de moléculas.

Todos los conjuntos de cosas vivas presentan propiedades no esperadas desde el punto de vista de un solo elemento vivo. Nosotros, y algunos otros animales, mantenemos una temperatura constante cualquiera que sea la temperatura de nuestro alrededor. Este hecho nunca hubiera podido ser observado a partir de la consideración de una sola célula de un cuerpo humano. La tendencia a la constancia fue observada por primera vez por el fisiólogo francés Claude Bernard en el siglo XIX. Su sucesor americano de este siglo, Walter Cannon, la llamó homeostasis, o sabiduría del cuerpo.

La homeostasis es una propiedad coligativa de la vida.

No tenemos problemas con la idea de que las entidades nobles como los seres humanos están formadas por una serie de comunidades celulares interconectadas de forma intrincada. No encontramos muy difícil considerar una nación o una tribu como una entidad formada por su gente y el territorio que ocupan. ¿Pero qué podemos decir acerca de las grandes entidades como los ecosistemas y Gaia? Fue necesario ver la Tierra desde el espacio, directamente a través de los ojos de los astronautas o indirectamente mediante los medios de comunicación, para que nos diera la sensación personal de un planeta realmente vivo en el que las cosas vivas, el aire, el océano y las rocas se combinan en una sola entidad como Gaia.

El nombre del planeta vivo, Gaia, no es un sinónimo de biosfera. La biosfera se define como la parte de la Tierra en que normalmente existen los seres vivos. Tampoco Gaia es mismo que biota, que simplemente se refiere al conjunto de todos los organismos vivos. El biota y la biosfera tomados conjuntamente forman parte de Gaia, pero no la constituyen en su totalidad.

Así como el caparazón es parte del caracol, las rocas, el aire y los océanos son parte de Gaia. Tal como veremos, Gaia tiene una continuidad que se remonta en el pasado hasta los orígenes de la vida y que se extiende en el futuro en la medida en que la vida persista. Gaia, como ser planetario total, tiene propiedades que no son nece-

sariamente discernibles a partir del único conocimiento de las especies individuales o de las poblaciones de organismos que viven juntos.

La hipótesis de Gaia, cuando la expusimos en los años setenta, suponía que la atmósfera, los océanos, el clima y la corteza de la Tierra se encuentran ajustados a un estado adecuado para la vida por el comportamiento de los mismos organismos vivos.

Concretamente, la hipótesis de Gaia dice que la temperatura, el estado de oxidación, de acidez y algunos aspectos de las rocas y las aguas se mantienen constantes en cualquier época, y que esta homeostasis se obtiene por procesos cibernéticos llevados a cabo de manera automática e inconsciente por el biota. La energía solar sustenta estas condiciones favorables para la vida. Estas condiciones son sólo constantes a corto plazo y evolucionan en sincronía con los cambios requeridos por el biota a lo largo de su evolución. La vida y su entorno están tan íntimamente asociados que la evolución afecta a Gaia, no a los organismos o al medio ambiente por separado.

La mayor parte de mi vida de trabajo ha estado dedicada a los límites de las ciencias de la vida, pero no me considero a mí mismo como un biólogo, ni creo que los biólogos me acepten como uno de ellos. Vista desde fuera, una gran parte de la biología parece como un edificio de bases de datos -en el que se encuentra un catálogo completo de la vida-. A veces, a modo de fábula, me imagino que para los biólogos el mundo vivo es una amplia serie de colecciones de libros guardada en bibliotecas interconectadas.

En este sueño, los biólogos son como competentes bibliotecarios que establecen la clasificación más intrincada de cada nueva biblioteca que descubren, pero que nunca leen los libros. Sienten que les falta algo en sus vidas, y este sentimiento se intensifica en la medida que es más difícil encontrar nuevas colecciones de libros. Entiendo a los biólogos expresando un palpable sentimiento de alivio cuando junto a los biólogos moleculares se atreven incluso a clasificar las palabras que contienen los libros. Eso significa que la búsqueda de la respuesta para la terrible pregunta de cuál es el conte-

nido de los libros puede ser pospuesta hasta que la nueva e infinitamente detallada clasificación molecular sea completada.

Mi mundo imaginario, poblado de biólogos coleccionistas de libros, de ninguna manera pretende ser una mofa de las ciencias de la vida. Si en semejante mundo no hubiera encontrado más medios que los míos propios todavía habría sido menos productivo.

Impaciente por obtener una respuesta, acerca de «¿cuál es el sentido de los libros?», hubiera intentado abordar alguno a partir de pruebas experimentales -por ejemplo quemándolos en un calorímetro y midiendo de manera precisa el calor desprendido-. Mi sentimiento de frustración no habría disminuido cuando hubiera descubierto que las páginas densamente empaquetadas de una enciclopedia no dan más calor que la misma masa de papel en blanco. Al igual que la clasificación de los biólogos, este experimento físico hubiera sido profundamente insatisfactorio porque hubiera planteado la pregunta equivocada a la naturaleza.

¿Pueden los científicos, cualesquiera que sean, hacerlo mejor en estas pesquisas para comprender la vida?

Existen tres puntos de vista igualmente consistentes: la biología molecular, el estudio de las moléculas químicas que contienen la información correspondiente a la genética básica de toda la vida de la Tierra; la fisiología, la ciencia que trata de los sistemas vivos contemplados desde una perspectiva holística; y la termodinámica, la rama de la física que trata del tiempo y de la energía, y que conecta los procesos vitales con las leyes fundamentales del universo.

Uno de estos puntos de vista, el último, es el que permite ir más lejos en las investigaciones para 'definir la vida, aunque de momento los progresos realizados han sido mínimos. La termodinámica creció desde unos orígenes básicos, a partir del esfuerzo de los ingenieros por fabricar máquinas de vapor más eficientes, y floreció durante el último siglo, poniendo a prueba y ocupando las mentes de los mejores científicos.

La primera ley de la termodinámica se refiere a la energía o, en otras palabras, a la capacidad de realizar trabajo. Este principio dice que la energía se conserva. La energía que en forma de luz solar

cae sobre las hojas de un árbol se utiliza de diferentes maneras. Una parte es reflejada, y de ese modo podemos ver las hojas verdes, una parte es absorbida y las calienta, y otra parte es transformada en alimento y oxígeno. En última instancia nosotros comemos el alimento, lo consumimos con el oxígeno que respiramos, y por tanto utilizamos la energía solar para movernos, pensar y mantenernos calientes.

La primera ley dice que esta energía siempre se conserva y que, independientemente de lo lejos que se disperse, la suma total siempre permanece constante.

La segunda ley habla de la asimetría de la naturaleza. Cuando el calor se transforma en trabajo siempre se desperdicia algo. La redistribución de la cantidad total de energía en el universo tiene una dirección, según la segunda ley: siempre se mueve pendiente abajo. Los objetos calientes se enfrían, pero los objetos fríos nunca se calientan espontáneamente.

Puede parecer que se rompe la ley cuando se golpea alguna forma de energía metaestable almacenada, como cuando se enciende una cerilla, o un trozo de plutonio sufre una fisión. Sin embargo, la energía ya no puede recuperarse una vez usada. La ley no ha sido rota, sólo se ha redistribuido la energía y se ha mantenido el camino cuesta abajo. El agua no fluye río arriba desde el mar a las montañas. Los procesos naturales siempre se mueven hacia un incremento del desorden que se mide por la entropía, cantidad que siempre e inexorablemente aumenta.

La entropía es real, no es una noción difusa inventada por catedráticos para poner a prueba a los estudiantes con preguntas de examen difíciles. De manera semejante a la longitud de un trozo de cuerda o a la temperatura de un vaso de vino, es una cantidad física mensurable. De hecho, como la temperatura, la entropía de una sustancia tiene un valor prácticamente nulo en el cero absoluto a $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cuando se añade calor a un cuerpo material no sólo aumenta la temperatura sino también la entropía.

Pero por desgracia existe una complicación: si se puede medir la temperatura con un termómetro, no se puede medir directamente la

entropía con un «entropómetro». La entropía, medida en unidades de calorías por gramo y por grado, es el calor total añadido dividido por la temperatura.

Consideremos la perfección de un copo de nieve, un cristal ordenado de manera tan exquisita en su distribución fractal que constituye uno de los objetos inertes más intrincados. La cantidad de calor necesaria para fundir un copo de nieve es 80 veces superior que la cantidad necesaria para calentar una gota de agua un solo grado de temperatura. El incremento en entropía cuando los copos de nieve se funden es 80 veces superior que cuando se calientan de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ al punto de fusión. Por otra parte, la formación de hielo muestra que el orden perfecto de un copo de nieve representa una disminución de entropía del mismo orden. La entropía está conectada desde un punto de vista cuantitativo con el desorden de las cosas. A mayor orden más baja es la entropía.

Me gusta pensar que la entropía muestra la propiedad más auténtica de nuestro universo: su tendencia a declinar, a consumirse. Otros la ven como la dirección de la flecha del tiempo, una progresión inevitable desde el nacimiento a la muerte. Lejos de ser algo trágico o causa de dolor, esta tendencia natural hacia la decadencia nos beneficia. Sin el declive general del universo no podría haber existido el Sol y, sin el consumo superabundante de su reserva de energía, el Sol nunca hubiera proporcionado la luz que nos permite existir.

La segunda ley es la más fundamental y no cuestionada del universo; como era de esperar, todo intento de comprender lo que es la vida debe tenerla en cuenta. El primer libro que leí sobre la cuestión de la vida era de un físico austriaco, Erwin Schrödinger. Tenía curiosidad por la biología y se preguntó si el comportamiento de las moléculas fundamentales de la vida se podría explicar mediante la física y la biología. Su famoso librito titulado *¿Qué es la vida?* es una recopilación de conferencias públicas sobre este tema que pronunció en Dublín durante su exilio en la segunda guerra mundial.

El describe su objetivo en la primera página:

«El problema vasto, importante y muy discutido, es éste: ¿Cómo pueden la física y la química dar cuenta de los fenómenos espacio-temporales que tienen lugar dentro de los límites espaciales de un ser vivo?».

Continúa escribiendo:

«La evidente incapacidad de la física y química actuales para tratar tales fenómenos no significa en absoluto que ello sea imposible».

(*)

En aquellos tiempos los físicos estaban acostumbrados a estudiar lo inerte, el mundo cercano al equilibrio de los «cristales periódicos» (cristales de regularidad predecible, un átomo de un tipo siguiendo siempre a otro de tipo diferente en un modelo recurrente). Incluso estas estructuras comparativamente simples eran suficientemente complejas como para llevar hasta el límite las capacidades de la instrumentación entonces disponible.

Los químicos orgánicos estaban descubriendo las estructuras intrincadas de los «cristales aperiódicos» de la materia viva, tales como las proteínas, polisacáridos y ácidos nucleicos. Todavía se encontraban lejos del nivel de conocimiento actual de la naturaleza química del material genético. Schrödinger concluyó que, de forma metafórica, la propiedad más sorprendente de la vida es su capacidad de desplazarse hacia arriba contra el flujo del tiempo. La vida es una contradicción paradójica a la segunda ley, que establece que todo está, ha estado y estará moviéndose hacia abajo, hacia el equilibrio y la muerte. Sin embargo, la vida evoluciona hacia una mayor complejidad y se caracteriza por una improbabilidad omnipresente que, por comparación, hace que parezca trivial ganar la lotería año tras año.

Todavía resulta más sorprendente el hecho de que este estado aparentemente inestable e ilegal ha persistido en la Tierra durante una fracción notoria de la edad del Universo. La vida no tiene manera de violar la segunda ley, ha evolucionado con la Tierra como un

* *Citamos por la traducción española de Ricardo Guerrero en Tusquets Editores, Barcelona, 1983, pág. 18. (N. del T.)*

sistema estrechamente acoplado para asegurarse la supervivencia. Es como un contribuyente experto, nunca evade el pago de un impuesto, pero tampoco pierde nunca una desgravación. Una parte importante del libro de Schrödinger es una predicción optimista de cómo se puede llegar a comprender la vida.

El eminente biólogo molecular Max Perutz ha comentado recientemente que pocas cosas son originales en el libro de Schrödinger, y que lo que es original a menudo está equivocado. Puede ser verdad, pero yo, como muchos de mis colegas, todavía agradecemos a Schrödinger el habernos hecho pensar de un modo productivo.

El gran físico Ludwig Boltzmann expresó el sentido de la segunda ley en una ecuación de gran elegancia y simplicidad:

$$S = k(\ln P),$$

donde S es esta magnitud extraña que es la entropía, k es una constante llamada acertadamente constante de Boltzmann, y $\ln P$ es el logaritmo natural de la probabilidad.

Quiere decir lo que dice: cuanto menos probable es una cosa menor es su entropía.

Por tanto, la cosa más improbable de todas, la vida, tiene asociada la entropía más baja. Schrödinger no estaba contento con la asociación de algo tan importante como la vida con una magnitud disminuida, la entropía. En lugar de ello propuso el término “negentropía”, el recíproco de la entropía, es decir, 1 dividido por la entropía o $1/S$. Por supuesto, la negentropía es grande para las cosas improbables tales como los organismos vivos. Describir la activa vida de nuestro planeta como algo improbable puede parecer raro.

Sin embargo, imaginemos que algún cheff cósmico toma todos los ingredientes de la Tierra actual en forma de átomos, los combina y los deja estar. La probabilidad de que estos átomos se combinen en las moléculas que constituyen nuestra Tierra viva es cero. La mezcla siempre reaccionaría químicamente para formar un planeta muerto como Marte o Venus.

En el pensamiento científico a menudo se concibe la misma idea en diferentes contextos y en distintas partes del mundo: No hay nada esotérico al respecto. Las ideas, como las divisas, se encuentran en uso continuo en los intercambios entre científicos y, como el dinero, se pueden usar para comprar cosas muy diversas. Cuando Schrödinger estaba enseñando en Dublín, Claude Shannon estaba investigando una magnitud similar en Estados Unidos, pero desde un punto de vista radicalmente diferente.

Shannon, en los laboratorios Bell Telephone, estaba desarrollando la teoría de la información. Empezó como una simple investigación de un ingeniero acerca de los factores físicos que determinan que un mensaje enviado por cable pierda información cuando viaja del remitente al destinatario. Shannon pronto descubrió una cantidad que tiende a aumentar siempre; la magnitud del incremento era una medida de la pérdida de información. En ningún experimento se observó que el tamaño de esta cantidad disminuyese.

Siguiendo los consejos de John von Neumann, un físico matemático, Shannon nombró a esta cantidad entropía, porque se parecía extraordinariamente al concepto de entropía de los ingenieros. El recíproco de la entropía de Shannon es la cantidad llamada información. Si asumimos que la entropía que descubrió Shannon es la misma que la entropía de los ingenieros, entonces la magnitud elusiva que Schrödinger asoció con la improbabilidad de la vida -la negentropía- es comparable con la información de Shannon.

En términos matemáticos, si S es la entropía, tanto la negentropía como la información son $1/S$.

La recompensa que se obtiene al perseverar en consideraciones sobre conceptos tan difíciles es un avance en el esclarecimiento de nuestra investigación por comprender la vida y Gaia. La contribución de la teoría de Shannon indica que la información no sólo es conocimiento. En términos termodinámicos información es una medida de la ausencia de ignorancia. Es mejor conocerlo todo acerca de un sistema sencillo que únicamente una gran cantidad de cosas acerca de un sistema complejo. A menor ignorancia menor es la entropía. Se explica así por qué es tan difícil abordar el concepto

de Gaia desde el conocimiento voluminoso pero aislado de una sola disciplina científica.

Si la segunda ley nos dice que la entropía del universo aumenta, ¿cómo se las arregla la vida para evitar la tendencia general a la degeneración? Un físico británico, J.D. Bernal, intentó establecer un balance. En 1951 escribió con una terminología críptica:

«La vida forma parte del tipo de fenómenos que son sistemas abiertos o en reacción continua y son capaces de disminuir su entropía interna a expensas de la energía libre tomada del medio ambiente y subsiguientemente devuelta al mismo en forma degradada».

Muchos otros científicos han expresado estas palabras en forma de ecuación matemática. Entre las más claras y fáciles de entender están las expresiones de un libro pequeño, *The Thermodynamics of the Steady State* [La termodinámica del estado estacionario], escrito por el físico-químico K.G. Denbigh.

Estas pueden ser reescritas de una manera rigurosa pero más comprensible tal como sigue. Por el hecho de vivir, un organismo genera entropía continuamente, y provoca un flujo de entropía hacia fuera a través de sus límites. Tú mismo, lector, en el momento en que lees estas palabras, estás creando entropía al consumir oxígeno, además de las grasas y los azúcares almacenados en tu cuerpo. Cuando respiras, excretas desechos con alto contenido en entropía al aire, tales como el dióxido de carbono, y tu cuerpo cálido emite radiación infrarroja rica en entropía a tu alrededor.

Si tu disipación de entropía es igual o superior a tu generación interna de entropía, continuarás viviendo y serás capaz de evitar de manera milagrosa e improbable, pero lícita, la segunda ley del universo. «Disipación de entropía» fundamentalmente es una forma elegante de expresar palabras sucias tales como excremento y contaminación. A pesar del riesgo de que me retiren mi carné de afiliado a la Asociación de Amigos de la Tierra, tengo que decir que sólo sobrevivimos gracias a la contaminación.

Nosotros, los animales, contaminamos el aire con dióxido de carbono, y la vegetación contamina con oxígeno. La contaminación de uno es el alimento del otro. Gaia es más sutil y, por lo menos hasta que aparecieron los seres humanos, sólo contaminó esta región del sistema solar con un suave calentamiento consistente en radiación infrarroja.

Recientemente se han producido algunos descubrimientos interesantes relacionados con el trabajo de Ilya Prigogine y sus colaboradores acerca de la termodinámica de las turbulencias, vórtices y otros muchos sistemas transitorios bajos en entropía. Las turbulencias y remolinos se desarrollan espontáneamente cuando hay un flujo suficiente de energía libre. Fue en el siglo XIX cuando un físico británico, Osborne Reynolds, intrigado por las condiciones que daban lugar a la turbulencia en el flujo de los fluidos, descubrió que el inicio de estas turbulencias en una corriente de agua o en el flujo de un gas sólo ocurría cuando el flujo excedía un valor crítico.

Una analogía útil a este respecto consiste en el hecho de que si soplamos una flauta demasiado suavemente no se produce ningún sonido. Pero si se sopla con fuerza suficiente se forman turbulencias de viento que entran en la parte del sistema que produce el sonido. Mediante la extensión de las fórmulas anteriores del físico-químico americano Lars Onsager, Prigogine y sus colaboradores aplicaron la termodinámica de los estados estacionarios al desarrollo de lo que se puede denominar como termodinámica de los «estados lejos del equilibrio». Clasificaron estos fenómenos con el término «estructuras disipativas».

Tienen la estructura, pero no la estabilidad de los sólidos. Se disipan cuando el suministro de energía se acaba. Entre estas estructuras figuran muchos artefactos, como los refrigeradores, y fenómenos naturales como las llamas, torbellinos, huracanes y algunas reacciones químicas peculiares. Los organismos vivos incluyen estructuras disipativas en su interior, de tipo muy diverso.

Sin embargo, las cosas vivas son tan infinitamente complejas en comparación con las estructuras disipativas fluidas que muchos creen que la termodinámica actual, aunque se encuentra en el buen

camino, todavía tiene mucho camino que recorrer para poder definir la vida.

Físicos, químicos y biólogos, aunque no rechazan estas nociones, no las tienen en cuenta como punto de partida de sus trabajos. Su respuesta se parece a la que puede dar una congregación de gente adinerada ante las exhortaciones de su sacerdote sobre las virtudes de la pobreza. Se considera algo bueno, pero no una norma de vida válida para la semana que viene.

Una aportación crucial de las generalizaciones de Schrödinger sobre la vida fue que los sistemas vivos tienen límites. Los organismos vivos son sistemas abiertos en el sentido de que toman y excretan energía y materia. En teoría son tan abiertos como los límites del universo. Sin embargo, también están encerrados en una jerarquía de límites internos.

Cuando nos dirigimos hacia la Tierra desde el espacio, lo primero que apreciamos es el límite atmosférico que engloba a Gaia, luego los límites de un ecosistema, como por ejemplo los bosques, después la piel o la corteza de los animales vivos y plantas, más allá están las membranas celulares y, finalmente, los núcleos de las células y su ADN. Si se define la vida como un sistema autoorganizado que mantiene activamente una entropía baja, entonces, visto desde el exterior de cada uno de estos límites, lo que hay dentro está vivo.

El concepto de que algo tan grande y aparentemente inanimado como la Tierra está vivo puede resultar difícil de admitir. Se puede afirmar que la Tierra es casi roca pura, y la mayor parte de ella incandescente, debido al calor interno. Estoy en deuda con Jerome Rothstein, un físico, por su clarividencia en éste y otros aspectos.

En un elaborado trabajo acerca del concepto de la Tierra viviente (presentado en un simposio celebrado durante el verano de 1985 por la Audubon Society) observó que se puede paliar esta dificultad recordando la imagen de un secoya gigante. Indudablemente el árbol está vivo, pero el 99 % del mismo está muerto. El gran árbol es una lanza antigua de madera muerta, hecha de lignina y celulosa por los ancestros de la fina capa de células vivas que constituyen su

corteza. Como en la Tierra, especialmente si nos fijamos en que muchos de los átomos que se encuentran en las rocas del magma fueron una vez parte de las formas de vida ancestral de las que provenimos.

Cuando se contempló la Tierra por primera vez desde el exterior y se comparó, como planeta en su conjunto, con sus socios sin vida, Marte y Venus, fue imposible evitar la sensación de que la Tierra era una anomalía extraña. Incluso a este planeta no convencional hubiera permanecido probablemente en la trastienda, como la Cenicienta, si la NASA, en su papel de Príncipe, no hubiera venido a rescatarlo por medio del programa espacial de exploración planetaria.

Tal como vimos en el capítulo primero, las cuestiones que originaron el programa espacial estuvieron centradas al principio en una cuestión práctica:

¿Cómo se puede identificar la vida en otro planeta? Puesto que esta cuestión no pudo ser explicada únicamente mediante la biología o la geología convencional, empecé a preocuparme por otra pregunta: la diferencia entre la composición atmosférica de la Tierra y la de sus vecinos Marte y Venus ¿es una consecuencia del hecho de que sólo la Tierra contiene vida?

La parte menos compleja y más fácilmente accesible de un planeta es su atmósfera. Antes de que la nave espacial Viking aterrizase en Marte, o la rusa Venera aterrizase en Venus, ya sabíamos la composición de sus atmósferas. A mediados de los años sesenta, se utilizaron telescopios para captar la luz infrarroja reflejada por los gases atmosféricos de Marte y Venus.

Estas observaciones revelaron la identidad y proporción de los gases con bastante exactitud. Marte y Venus tienen atmósferas dominadas por el dióxido de carbono, con sólo proporciones pequeñas de oxígeno y nitrógeno. Más importante todavía, ambos poseen atmósferas que se encuentran cercanas al estado de equilibrio químico. Si tomáramos un volumen de aire de alguno de estos planetas y lo calentáramos hasta la incandescencia en presencia de una muestra representativa de las rocas de la superficie para luego de-

jarlo enfriar suavemente, prácticamente no se produciría ningún cambio después del experimento. Por el contrario, la Tierra tiene una atmósfera dominada por nitrógeno y oxígeno.

Sólo se encuentran algunas trazas de dióxido de carbono, muy por debajo de las expectativas de la química planetaria. También hay gases inestables, como el óxido nitroso, y gases como el metano que reaccionan rápidamente con el abundante oxígeno. Si se intentara el mismo experimento de calentamiento y enfriamiento con una muestra del aire que ahora respiramos, ésta cambiaría.

Se convertiría en algo semejante a las atmósferas de Marte y Venus: predominio de dióxido de carbono, disminución de oxígeno y nitrógeno y ausencia de gases como el óxido nitroso y metano. No es demasiado inverosímil considerar el aire como una mezcla de gases que entra en el interior de una máquina de combustión interna: contiene una mezcla de gases combustibles, hidrocarburos y oxígeno. Las atmósferas de Marte y Venus son como los gases de un tubo de escape; toda la energía ya ha sido agotada.

La sorprendente improbabilidad de la atmósfera de la Tierra revela la presencia de negentropía y de la invisible mano de la vida.

Tomemos por ejemplo el oxígeno y el metano. Ambos se encuentran en nuestra atmósfera en proporciones constantes; sin embargo, en presencia de la luz solar reaccionan químicamente para producir dióxido de carbono y vapor de agua. La concentración de metano es de alrededor de 1,5 partes por millón en cualquier parte de la Tierra.

Ello implica que cerca de 1.000 millones de toneladas de metano se introducen anualmente en la atmósfera para mantenerlo a un nivel constante. Además, el oxígeno utilizado en la oxidación del metano debe ser reemplazado -eso significa, por lo menos, 2.000 millones de toneladas anuales-. La única explicación posible para la persistencia de esta atmósfera inestable, pero de composición constante, durante períodos mucho más extensos que el tiempo de reacción de sus gases es la influencia de un sistema de control, Gaia.

A menudo se hace difícil reconocer la gran entidad de la que formamos parte; como se suele decir, los árboles no nos dejan ver el

bosque. Así ocurría con la misma Tierra hasta que compartimos indirectamente con los astronautas aquella versión tan sorprendente y espectacular. Aquella impecable esfera que marca la división entre las ideas del pasado y del presente. Este regalo, la capacidad de ver la Tierra desde el exterior, fue tan revelador que forzó a desarrollar un nuevo planteamiento de la biología, de arriba abajo.

Los conocimientos convencionales de la biología siempre se habían visto obligados a seguir un planteamiento de abajo arriba debido al simple tamaño de la Tierra en comparación con nosotros o con cualquier cosa viva que conozcamos. Los dos planteamientos son complementarios. Cuando se estudia un microbio, un animal o una planta, el punto de vista fisiológico de arriba abajo muestra la vida como un sistema armónico que se funde con el punto de vista de abajo arriba proveniente de la biología molecular: que la vida es una colectividad constituida por un vasto conjunto de partes ultramicroscópicas.

Desde los tiempos de James Hutton ha habido una «leal oposición» de los científicos que dudaban del criterio tradicional según el cual la evolución del medio ambiente estaba determinada únicamente por fuerzas físicas y químicas. Vernadsky recogió el concepto de biosfera de Suess para definir los límites del sistema en que se encuentra el biota. Desde Vernadsky, ha existido una tradición continuada (la denominada biogeoquímica) en la Unión Soviética -y en menor medida en todas partes- que ha ido mostrando la interacción entre los suelos, océanos, lagos, ríos y la vida que conllevan.

Tal como dejó bien sentado un ruso, M.M. Yermolaev, en *An Introduction to Physical Geography* [Una introducción a la geografía física]:

“La biosfera se entiende como una parte de la cubierta geográfica de la Tierra, dentro de los límites de las condiciones físico-geográficas que aseguran el trabajo normal de los enzimas”.

Los miembros más recientes de esta oposición científica son, entre otros:

Alfred Lotka, de la Universidad John Hopkins, y Eugene Odum, el único ecólogo que ha abordado los ecosistemas desde un punto de

vista fisiológico; dos americanos de origen europeo, el limnólogo G. Evelyn Hutchinson y el paleontólogo Heinz A. Lowenstam; un oceanógrafo británico, A. Redfield, y un geoquímico sueco, L.G. Sillén.

Todos destacan la importancia de la vida en la evolución del medio ambiente. Sin embargo, muchos geólogos han ignorado la presencia de organismos vivos, como participantes activos, en sus teorías de la evolución de la Tierra.

La contrapartida de esta discriminación geológica es la incapacidad de muchos biólogos para darse cuenta de que la evolución de muchas especies está estrechamente asociada a la evolución de su medio ambiente.

Por ejemplo, en 1982 apareció un libro, *Evolution Now: A Century after Darwin* [Evolución ahora: un siglo después de Darwin], editado por John Maynard Smith, que consistió en un conjunto de ensayos de biólogos ilustres acerca de los aspectos más controvertidos de la biología evolutiva.

En este conjunto, la única (y enigmática) referencia al medio ambiente está en un ensayo de Stephen Jay Gould:

«Los organismos no son bolas de billar golpeados de manera determinista por el taco de la selección natural y rodando por la mesa de la vida hasta las posiciones óptimas. Ellos también influyen en su propio destino a través de formas complejas y amplias.»

Debemos reintroducir este concepto en la biología evolutiva.

Aparte de Lynn Margulis, el único otro biólogo que conozco que haya tenido en cuenta el medio ambiente cuando considera el fenómeno de la vida es J.Z. Young. En 1971, este ilustre fisiólogo escribió, de forma independiente a otros estudios, un capítulo sobre homeostasis en su libro, *An Introduction to the Study of Man* [Una introducción al estudio del hombre]

Según sus propias palabras,

«la entidad que se mantiene intacta, y de la que todos formamos parte, no es la vida de uno de nosotros, sino en última instancia el conjunto de la vida en el planeta».

El punto de vista de J.Z. Young sirve de enlace entre la teoría de Gaia y el consenso científico. A través de la teoría de Gaia entiendo la Tierra y la vida en ella como un sistema, un sistema que tiene la capacidad de regular la temperatura y la composición de la superficie de la Tierra, y de mantenerla idónea para los organismos vivos.

La autorregulación del sistema es un proceso activo impulsado por la energía libre proporcionada por el Sol. La primera reacción observada después de la presentación de la teoría de Gaia a principios de los años setenta fue de ignorancia en el sentido más literal. La mayor parte de la hipótesis de Gaia fue ignorada por los científicos profesionales. Y sólo a finales de los setenta empezó a ser criticada.

La crítica certera es como un baño de agua helada. La repentina desazón de la inmersión en lo que parece un medio hostil remueve inmediatamente la sangre y aguza los sentidos. Mi primera reacción al leer las críticas de W. Ford Doolittle a la hipótesis de Gaia en *CoEvolution Quarterly* de 1979 fue de estupor e incredulidad.

El artículo estaba espléndidamente estructurado y muy bien escrito, lo que no disminuyó su frigididad. Las aguas heladas pueden ser hermosas, pero esto no las hace más cálidas. Sin embargo, después de una inmersión en aguas heladas viene la relajación cuando se toma el sol en la playa. Después de un rato me di cuenta de que las críticas de Ford Doolittle debían ser tomadas no tanto como un ataque a Gaia sino a la manera inadecuada de su presentación.

Gaia había sido vista por primera vez desde el espacio y se utilizaron argumentos termodinámicos. Para mí era evidente que la Tierra estaba viva en el sentido de que era un sistema autoorganizado y autorregulado.

Para Ford Doolittle, desde sus conocimientos de la biología molecular, también era obvio que la evolución mediante la selección natural nunca hubiera podido dar lugar a un «altruismo» a escala global. Su idea estaba basada en los sólidos y efectivos textos de Richard Dawkins en su libro *The Extended Phenotype* [El fenotipo extendido] (1982).

A partir de su mundo de microscopios, ¿cómo era posible que los intereses «egoístas» de las células se manifestaran a escalas planetarias?

Para estos biólogos competentes y trabajadores plantear la regulación de la atmósfera por parte de la vida microbiana parecía tan absurdo como esperar que la legislación de algún gobierno humano pudiera afectar a la órbita de Júpiter. Estoy en deuda con ellos por haber mostrado de forma clara que dábamos demasiadas cosas por supuestas y que Gaia no tenía una base teórica firme.

No sólo los biólogos moleculares pusieron reparos a Gaia. Otros dos críticos ilustres fueron el climatólogo Stephen Schneider, de Colorado, y el geoquímico H.D. Holland, de Harvard. Estos, de acuerdo con la mayoría de sus colegas, preferían explicar los acontecimientos en la evolución de las rocas, el océano, el aire y el clima sólo mediante fuerzas físicas y químicas.

En su libro *The Chemical Evolution of the Atmosphere and the Oceans* [La evolución química de la atmósfera y de los océanos], Holland escribió:

«Encuentro la hipótesis interesante y bonita, pero en el fondo insatisfactoria. El registro sedimentario parece estar mucho más de acuerdo con el hecho de que los organismos que eran más capaces de competir han dominado, y que los procesos y el medio ambiente próximos a la superficie de la Tierra se han adaptado a los cambios forjados por la evolución biológica.

Muchos de estos cambios han tenido que ser fatales o casi fatales para gran parte de los seres vivos existentes en un momento dado. Vivimos en una Tierra que es el mejor de los mundos sólo para aquellos que se han adaptado a ella».

Los reparos de Stephen Schneider -expuestos en su libro escrito junto con Randi Londer, *The Coevolution of Climate and Life* [La coevolución del clima y la vida] -se refieren a los planteamientos de los primeros trabajos acerca de Gaia, donde se exponía que la homeostasis es la única forma de regulación climática.

Estoy en deuda con estos autores porque demostraron que dábamos por sentadas demasiadas cosas y que a Gaia le faltaba una base teó-

rica firme. Mi gratitud es todavía mayor hacia Stephen Schneider, que se aseguró de que el tema de Gaia fuese debatido de forma adecuada por la comunidad internacional convocando una Chapman Conference de la Unión Americana de Geohsica en marzo de 1988.

Para muchos científicos, Gaia era un concepto teleológico que requería ser previsto y planificado por el biota. ¿Cómo es posible que las bacterias, los árboles y los animales tuvieran una reunión para decidir cuáles eran las condiciones óptimas? ¿Cómo podían mantener los organismos el oxígeno a un nivel del 21 por ciento y la temperatura media a 20 °C? Al no observar ningún mecanismo de control planetario denegaron su existencia como fenómeno y reclamaron la hipótesis de Gaia como teleológica. Esto era la condena final. En el mundo académico las explicaciones teleológicas son un pecado contra el espíritu santo de la racionalidad científica; niegan la objetividad de la naturaleza.

Pero con estas críticas rigurosas a Gaia los científicos parecen no haberse dado cuenta del alcance de sus propios errores. El uso inocente de otro concepto resbaladizo, el de «adaptación», es otro camino hacia la condenación. Realmente la Tierra es el mejor de todos los mundos para los que se han adaptado a ella. Pero la maravilla de nuestro planeta adquiere un significado diferente a la luz de los datos que los mismos geoquímicos han recogido. La evidencia muestra que la corteza de la Tierra, los océanos y el aire o son el producto directo de las cosas vivas o han sido modificados de forma masiva por su existencia.

Tengamos en cuenta que el oxígeno y el nitrógeno del aire provienen directamente de las plantas y microorganismos y que la creta y las calizas son las conchas de cosas vivas que una vez flotaron en el mar. La vida no se ha adaptado a un mundo inerte determinado por la mano muerta de la física y la química. Vivimos en un mundo que ha sido edificado por nuestros antecesores, antiguos y modernos, y que es mantenido cuidadosamente por todos los seres vivos que existen en la actualidad. Los organismos se adaptan a un mundo en que el estado material viene determinado por las actividades

de sus vecinos; ello significa que la transformación del medio ambiente es parte del juego.

Pensar de otra manera implica creer que la evolución era un juego con reglas parecidas a las del cricket o el béisbol juegos en que las reglas prohíben el cambio ambiental. En el mundo real, si la actividad de un organismo cambia su medio ambiente material a un estado más favorable y, como consecuencia de ello, deja más progenie, entonces tanto la especie como el cambio aumentarán hasta que se llegue a un nuevo estado estacionario.

A escala local, la adaptación es un mecanismo mediante el que los organismos pueden superar ambientes desfavorables, pero a escala planetaria el acoplamiento entre la vida y su ambiente es tan estrecho que el concepto tautológico de «adaptación» se deriva de la misma existencia. La evolución de las rocas y del aire y la evolución del biota no pueden estar separados.

Que la mayoría de científicos dedicados al estudio de la Tierra admita hoy que los gases reactivos de la atmósfera son productos biológicos viene a ser un tributo al éxito de la biogeoquímica. Sin embargo, la mayoría no estaría de acuerdo con el planteamiento de que el biota controla de alguna manera la composición de la atmósfera o alguna de sus variables importantes, como la temperatura global o la concentración de oxígeno.

Existen dos reparos principales a Gaia; el primero es que se trata de un concepto teleológico y que para la regulación del clima y de la composición química a escala planetaria hace falta una especie de capacidad de predicción, de clarividencia. El segundo reparo, expresado de forma muy clara por Stephen Schneider, se refiere a que la regulación biológica sólo es parcial, y que el mundo real es el resultado de una «coevolución» de lo vivo y lo inorgánico. Este segundo reparo es más complicado, y en gran medida el propósito de este libro es un intento de rebatirlo. El primero, el reparo teleológico, creo que está equivocado y ahora voy a intentar demostrar por qué.

Sabía que sería de poca ayuda compilar más datos acerca de la capacidad ya reconocida de la Tierra para regular su clima y compo-

sición. La nueva evidencia por sí misma no convencería a la mayor parte de científicos de que la Tierra está regulada por la vida.

Los científicos generalmente quieren conocer cómo funciona, quieren un mecanismo. Lo que hacía falta era un modelo gaiano. En ciencias híbridas como la biogeoquímica o la biogeofísica, los modelos del cambio ambiental no permiten que el biota tenga un papel regulador. Los especialistas de estas ciencias asumen que los rasgos operativos del sistema están fijados por las propiedades físicas y químicas. Por ejemplo, la nieve se funde o se forma a 0 °C.

El reflejo de la luz solar por la capa de nieve proporciona un efecto poderoso de realimentación durante el enfriamiento, y un sistema de regulación del clima podría estar basado en la fusión o formación de nieve. Pero no es posible que el punto de fusión de la nieve, que es una característica del hielo como sustancia, pueda trasladarse a una temperatura más idónea de, digamos, 20 °C. Por el contrario, los rasgos operacionales de un organismo siempre se encuentran fijados a niveles favorables.

¿De qué manera los modelos gaianos convencionales difieren de los biogeoquímicos convencionales? El planteamiento de una estrecha colaboración entre la vida y el ambiente en que se produce ¿cambia la naturaleza de todo el sistema? ¿Es la homeostasis una predicción razonable de la teoría de Gaia?

La dificultad de contestar a estas preguntas proviene de la mera complejidad del biota y del medio ambiente, porque ambos se encuentran interconectados de múltiples maneras. Difícilmente encontraremos un sólo aspecto de su interacción que pueda ser descrito de manera razonable por un ecuación matemática. Se necesitaba una simplificación drástica. Luché con el problema de reducir la complejidad de la vida y el medio ambiente a un esquema simple que pudiera iluminar sin distorsionar. El mundo de las margaritas era la respuesta.

Describí este mundo por primera vez en 1982, en una conferencia sobre biomineralización en Amsterdam, y publiqué un trabajo, «The Parable of Daisyworld» [La parábola del mundo de las margaritas] en *Tellus*, en 1983, junto con mi colega Andrew Watson.

Estoy en deuda con Andrew por la manera clara y gráfica de expresarlo en este trabajo mediante términos matemáticos formales.

Dibujemos un planeta de aproximadamente el mismo tamaño que la Tierra, girando sobre su eje y orbitando, a una distancia semejante a la de la Tierra, alrededor de una estrella de la misma masa y luminosidad que el Sol. Este planeta se diferencia de la Tierra en que tiene más área continental y menos océano, pero está bien provisto de agua y las plantas crecerán en cualquier parte de la superficie continental donde el clima sea adecuado.

Este es el planeta del mundo de las margaritas de diferente tono de color: algunas oscuras, algunas claras y algunas de colores neutros. La estrella que calienta e ilumina el mundo de las margaritas comparte con nuestro Sol la propiedad de aumentar su emisión de energía a medida que envejece. Cuando empezó la vida en la Tierra hace unos 3.800 millones de años, el Sol era alrededor de un 30 por ciento menos luminoso que ahora. En unos cuantos miles de millones de años más, será tan terriblemente caliente que toda la vida que conocemos ahora morirá o deberá encontrar otro planeta que le sirva de hogar.

El aumento del brillo del Sol según envejece es una propiedad general no cuestionada de todas las estrellas. La combustión de hidrógeno (su combustible nuclear) da lugar a la acumulación de helio. El helio, en forma de ceniza gaseosa, es más opaco a la energía radiante que el hidrógeno, lo que dificulta la radiación de calor desde el horno nuclear en el centro de la estrella.

Entonces la temperatura central aumenta y ello conlleva un aumento de la velocidad de combustión del hidrógeno hasta que se establece un nuevo balance entre el calor producido en el centro y el calor perdido en la superficie solar. Contrariamente a los fuegos normales, los fuegos nucleares de tamaño estelar queman más vigorosamente cuanto más se acumula la ceniza y algunas veces incluso explotan.

El mundo de las margaritas está simplificado, reducido, por decirlo así, del siguiente modo. El ambiente se circunscribe a una sola variable, temperatura, y el biota a una sola especie, margaritas. Si es

demasiado frío, por debajo de 5 °C, las margaritas no crecerán; su temperatura óptima se sitúa alrededor de 20 °C. Si la temperatura sobrepasa los 40 °C será demasiado caliente para las margaritas, y se marchitarán y morirán.

La temperatura media del planeta resulta del sencillo balance entre el calor recibido de la estrella y el calor perdido en las frías profundidades del espacio en forma de radiación infrarroja de onda larga. En la Tierra este balance de calor se complica por el efecto de las nubes y los gases como el dióxido de carbono. La luz solar puede ser reflejada hacia el espacio por las nubes antes de que pueda alcanzar y calentar la superficie.

Por otra parte, la cantidad de calor perdida por la superficie templada puede ser minimizada porque las nubes y las moléculas de dióxido de carbono lo reflejan de nuevo hacia ella misma. Asumimos que el mundo de las margaritas tiene una cantidad constante de dióxido de carbono, la suficiente para que las margaritas crezcan, pero no excesiva como para que interfiera en el clima. De manera semejante no hay nubes durante el día. Para no estropear la sencillez del modelo siempre llueve de noche.

Por tanto, la temperatura media del mundo de las margaritas viene determinada por el grado medio de oscurecimiento del color del planeta, o, tal como lo llaman los astrónomos, por el albedo. Si el planeta tiene una superficie oscura o albedo bajo, absorbe más calor de la luz solar y la superficie se calienta. Si el color es claro, como en la nieve recién caída, entonces el 70 o el 80 por ciento de la luz solar puede ser reflejada de nuevo hacia el espacio. Una superficie clara es fría cuando se la compara con una superficie oscura equivalente sometida a una cantidad equiparable de irradiación solar. Los albedos pueden tener valores entre 0 (totalmente negro) y 1 (totalmente blanco).

Consideramos que el suelo desnudo del mundo de las margaritas presenta habitualmente un albedo de 0,4 de manera que absorbe el 40 por ciento de la luz solar que recibe. Las margaritas comprenden un intervalo de colores desde el oscuro (con un albedo de 0,2) al claro (con un albedo de 0,7).

Imaginemos un momento en el pasado distante del mundo de las margaritas. La estrella que lo calienta era menos luminosa, de manera que sólo en la región ecuatorial la temperatura del suelo desnudo, 5 °C, era suficiente para el crecimiento. Aquí germinarían y florecerían lentamente las semillas de las margaritas.

Supongamos que en la primera cosecha se encontraban especies multicoloreadas, oscuras y claras, en proporciones semejantes. Las margaritas oscuras se verían favorecidas incluso antes de que la estación de crecimiento hubiera acabado. Su mayor absorción de la luz solar en los sitios donde crecían las hubiera calentado por encima de los 5 °C. Las margaritas con colores claros se hubieran encontrado en desventaja. Sus flores blancas hubieran palidecido y muerto porque al reflejar la luz solar se hubieran enfriado por debajo de la temperatura crítica de 5 °C.

En la estación siguiente hubiéramos apreciado un predominio de margaritas oscuras, ya que sus semillas serían más abundantes.

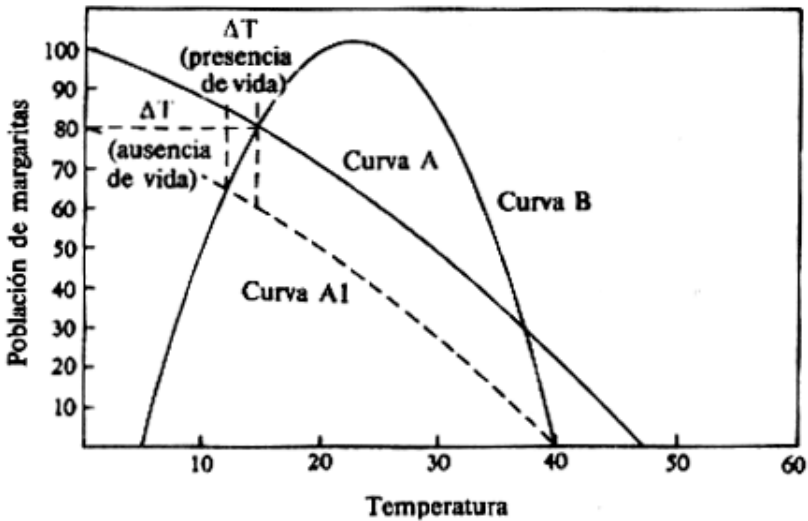
Pronto su presencia calentaría no sólo a las mismas plantas sino que, en la medida que crecieran y se dispersaran por la superficie desnuda, calentarían el suelo y el aire, primero localmente y luego regionalmente. Con este incremento de temperatura, la velocidad de crecimiento, el período de la estación templada, y la difusión de las margaritas oscuras, se produciría una realimentación positiva que daría lugar a una colonización de la mayor parte del planeta por margaritas oscuras. Eventualmente, la extensión de las margaritas oscuras se encontraría limitada por un incremento global de temperatura a niveles por encima del óptimo para el crecimiento.

Ahora, cualquier proliferación adicional de estas margaritas daría lugar a una caída en la producción de semillas. Además, cuando la temperatura global fuese alta, las margaritas claras crecerían y se extenderían en competencia con las oscuras. El crecimiento y extensión de las margaritas blancas estaría entonces favorecido por su capacidad natural para mantener el clima frío.

Cuando la estrella que brilla en el mundo de las margaritas envejece y se hace más caliente, la proporción de margaritas oscuras y claras cambia hasta que finalmente el flujo de calor es tan grande

que incluso la cosecha de margaritas más blancas no puede mantener el planeta por debajo del límite superior de 40° para el crecimiento. En este momento el poder de las llores ya no es suficiente. El planeta vuelve a ser yermo de nuevo y tan caliente que ya no hay manera de que puedan florecer nuevas margaritas.

Es fácil construir un modelo numérico del mundo de las margaritas que sea suficientemente sencillo como para trabajar con él en un ordenador personal. Las poblaciones de margaritas son evaluadas mediante ecuaciones diferenciales tomadas de la ecología teórica (Carter y Prince, 1981). La temperatura media del planeta se calcula directamente a partir del balance de calor que recibe desde la estrella y el calor que pierde por radiación a las frías profundidades del espacio.



2.1. Modelos de evolución del mundo de las margaritas de acuerdo con los conocimientos convencionales (A) y con la geofisiología (B).

La figura 2.1 muestra, de acuerdo con los conocimientos convencionales de la física y la biología, además de la geofisiología, la evolución de la temperatura y el crecimiento de las margaritas durante el progresivo incremento del flujo de calor procedente de su estrella.

Los cuadros superiores ilustran las poblaciones de margaritas en unidades arbitrarias y los inferiores muestran las temperaturas en grados Celsius. De izquierda a derecha, a lo largo del eje horizontal, la luminosidad de la estrella crece desde un 60 a un 140 por ciento respecto a la luminosidad de nuestro Sol. (A) ilustra cómo los físicos y los biólogos en completo aislamiento calculan la evolución de nuestro planeta desde su perspectiva. De acuerdo con estos conocimientos tradicionales, las margaritas sólo pueden responder adaptándose a los cambios de temperatura. Cuando el planeta esté demasiado caliente para un desarrollo idóneo, morirán. Pero en el universo gaiano (B), el ecosistema puede responder mediante el crecimiento competitivo de margaritas oscuras y claras, y regular la temperatura en un amplio margen de luminosidad. El trazo discontinuo en el cuadro inferior de B muestra cómo aumentaría la temperatura en ausencia de vida en el mundo de las margaritas.

Cuando probé por primera vez el modelo del mundo de las margaritas, quedé sorprendido y encantado de la fuerte regulación de temperatura planetaria que surgía del simple crecimiento competitivo de plantas de colores claros y oscuros. No inventé estos modelos porque pensase que las margaritas, o cualquier otro tipo de plantas coloreadas en tonos claros u oscuros pudieran regular la temperatura de la Tierra cambiando el balance entre el calor recibido por el Sol y el perdido en el espacio. Los diseñé para contestar a las críticas de Ford Doolittle y Richard Dawkins acerca de que Gaia era teleológica.

En el mundo de las margaritas se muestra que a propiedad del medio ambiente global, la temperatura, es regulada de manera efectiva en un intervalo amplio de luminosidad por un biota planetario imaginario, sin necesidad de suponer ninguna capacidad de predicción

o planificación. Ello representa una refutación definitiva de la acusación de que la hipótesis de Gaia es teleológica, y dicha refutación es, hasta el momento presente, incontrovertible.

Entonces, ¿que es Gaia? Si el mundo real en el que vivimos se autorregula de manera semejante al mundo de las margaritas, y el clima y el ambiente de que disfrutamos y explotamos libremente es la consecuencia de un sistema automático, aunque no intencionado, de statu quo, entonces Gaia es la manifestación mayor de vida.

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

1. Organismos vivos que crecen vigorosamente, explotando cualquier oportunidad ambiental posible.
2. Organismos que están sujetos a las reglas darwinianas de la selección natural: las especies de organismos que dejan más descendientes supervivientes.
3. Organismos que afectan a su ambiente físico y químico. Así los animales modifican la atmósfera mientras respiran tomando oxígeno y exhalando dióxido de carbono: Plantas y algas realizan el proceso inverso. Hay muchos otros procesos mediante los cuales los organismos modifican incesantemente el ambiente físico y químico.
4. La existencia de limitaciones o ataduras que establecen los límites de la vida. Puede hacer demasiado calor o demasiado frío; entre los dos extremos existe una temperatura adecuadamente templada, el estado óptimo. Puede haber demasiada acidez o demasiada alcalinidad; es preferible la neutralidad. Casi todos los productos químicos tienen un margen de concentración tolerable o necesario para la vida. Para muchos elementos, tales como el yodo, selenio y hierro, demasiado es un veneno, demasiado poco produce inanición. El agua pura no contaminada permitirá el desarrollo de pocas formas de vida, al igual que las salmueras saturadas del Mar Muerto.

Pocos científicos pondrían objeciones a alguna de estas cuatro condiciones, contempladas tanto individualmente como en grupo.

Sin embargo, cuando se toman en conjunto como un grupo de características estrechamente interrelacionadas, parecen proporcionar una receta de un sistema gaiano. El conjunto consiste en una fructífera descripción de modelos de sistemas autorregulados como el mundo de las margaritas. La cuarta condición, que establece los límites físicos y químicos de la vida, es la que encuentro más interesante, inesperada y llena de significado. Basta pensar en la analogía social de la familia o la comunidad que existe con limitaciones firmes, pero razonables, frente a la que tiene límites de comportamiento mal definidos.

Estabilidad y fronteras bien definidas parecen estar asociadas. Los médicos están de acuerdo con que la vida es un sistema abierto.

Sin embargo, como una de aquellas muñecas rusas que contiene una serie de muñecas más y más pequeñas, la vida existe dentro de una serie de límites. El límite exterior es el borde de la atmósfera terrestre con el espacio. Dentro de la frontera planetaria las entidades disminuyen, pero crecen incluso más intensamente cuando la progresión va desde Gaia a los ecosistemas, a las plantas y a los animales, a las células y al ADN.

Entonces la frontera planetaria circunscribe un organismo vivo, Gaia, un sistema constituido por todos los organismos vivos y el medio ambiente. No hay en ningún sitio de la Tierra una distinción clara entre materia viva y no viva. Sólo hay una jerarquía de intensidad desde el medio ambiente «material» de las rocas y de la atmósfera a las células vivas.

Sin embargo, a grandes profundidades debajo de la superficie, los efectos de la presencia de vida se desvanecen. Es posible que el centro de nuestro planeta no haya sido modificado como consecuencia de la vida, pero no sería juicioso darlo por sentado.

Investigando la pregunta «¿Qué es la vida?» hemos hecho algún progreso. Mirando la vida a través del telescopio gaiano la vemos como un fenómeno a escala planetaria durante un lapso de tiempo cosmológico: Gaia, como la manifestación mayor de vida, difiere de otros organismos de la Tierra como tú y yo diferimos de nuestra población de células vivas.

En algún tiempo de la historia de la Tierra, antes de que existiera la vida, la Tierra sólida, la atmósfera y los océanos todavía estaban evolucionando únicamente con las leyes de la física y la química. Estaban corriendo pendiente abajo hacia el estado estacionario e inerte de un planeta casi en equilibrio. Por un tiempo breve, en su vuelo precipitado entre los intervalos de los estados químicos y físicos, entró en un estado favorable para la vida. En un momento determinado, las células vivas recientemente aparecidas crecieron y su presencia afectó al medio ambiente de la Tierra hasta el punto de detener la inmersión precipitada hacia el equilibrio.

En este instante, las cosas vivas, las rocas, el aire y los océanos emergieron para formar una entidad nueva, Gaia. Del mismo modo que cuando el espermatozoide se funde con el óvulo se concibe una nueva vida.

La investigación para definir lo que es la vida se puede comparar con el ensamblado de un rompecabezas, un rompecabezas en el que una escena de un paisaje se corta en miles de pequeñas piezas interconectadas y las piezas se revuelven. Se necesita una clasificación para poner las cosas de nuevo juntas. El cielo azul es fácil de separar de la tierra marrón y los árboles verdes.

Las personas expertas en la resolución de rompecabezas saben que una etapa fundamental consiste en encontrar y conectar las piezas que tienen un lado recto correspondiente a los bordes, los límites de la escena. El descubrimiento de que los límites exteriores de la atmósfera son una parte de la vida planetaria ha definido de un modo parecido los bordes del rompecabezas de nuestro dibujo de la vida en la Tierra.

Una vez que el borde está totalmente ensamblado, por lo menos se conoce el tamaño del dibujo y es más fácil la colocación de los grupos interiores. Gaia no es un dibujo estático. Cambia permanentemente, así como la vida y la Tierra evolucionan conjuntamente.

Sin embargo en nuestro breve lapso de vida se mantiene estable el tiempo necesario para que empecemos a entenderla y ver lo hermosa que es.

EXPLORANDO EL MUNDO DE LAS MARGARITAS

“Dadme en cualquier momento un error provechoso, lleno de interrogantes, repleto de sus propias correcciones.”

(Vilfredo Pareto, comentario sobre Kepler)

La palabra teoría tiene la misma raíz griega que teatro. Ambas están relacionadas con la exhibición en un escenario.

En ciencia una teoría no es más que lo que le parece a su autor, una manera plausible de vestir los hechos y presentarlos a la audiencia. Como las obras de teatro, las teorías se juzgan de acuerdo con varios criterios diferentes y escasamente conectados. El contenido artístico es importante; una teoría que es elegante, sugestiva y está presentada con habilidad es apreciada universalmente.

Sin embargo, a los científicos muy trabajadores les gustaban las teorías repletas de predicciones que pueden ser comprobadas fácilmente. Tiene poca importancia si el punto de vista del teorizador es correcto o incorrecto: se estimula la investigación y la búsqueda, se descubren hechos nuevos, y se componen teorías nuevas.

Estar equivocado no supuso un demérito importante para la teoría de la creación continua de los astrónomos Hoyle, Bondi y Gold. Ahora la idea ha sido abandonada, pero en su día se trataba de un concepto intelectualmente satisfactorio. Las únicas teorías malas son aquellas que no pueden ser cuestionadas o evaluadas.

¿De qué sirve una teoría que diga que el universo fue creado de forma completa, con habitantes y todos con memoria de un pasado no existente, a las 15:37 horas el día 27 de octubre de 1917? No hay manera de probarlo o rechazarlo, y no proporciona predicciones útiles.

En una primera impresión, la hipótesis de Gaia puede parecer no comprobable. Evidentemente, sería impropio e irresponsable intentar llevar a cabo la vivisección de un planeta vivo. Afortunadamente ya ha pasado de moda el estilo utilizado en el siglo XIX para la investigación de las cosas vivas: «con sangre hasta los codos». Hemos aprendido de los ingenieros, que valoran sus artilugios mucho más de lo que la mayoría de nosotros valoramos los mecanismos infinitamente más complejos y hermosos de los organismos vivos.

Ellos nos han enseñado que se puede aprender mucho acerca de un sistema a partir de pruebas no invasivas, que la vivisección no es necesaria. Por tanto, la teoría de Gaia está abierta a varios modos de investigación experimental.

La evidencia más directa proviene del mundo real tal como es ahora. De manera semejante al hecho de que podemos comprobar el pulso, la presión sanguínea y la actividad eléctrica del corazón sin interferir en la fisiología normal del sujeto humano, también podemos observar el comportamiento del aire, los océanos y las rocas. Podemos medir el pulso estacional del dióxido de carbono en el aire y comprender cómo las plantas lo respiran e incorporan, mientras los consumidores lo respiran y expulsan.

Podemos seguir el trayecto de los nutrientes esenciales desde las rocas al océano, al aire y vuelta a empezar. También podemos apreciar cómo sistemas diferentes pero interrelacionados se encuentran implicados en cada paso.

Además de ello, disponemos de una enorme cantidad de evidencias históricas preservadas en las rocas. Durante su lapso de vida nuestro planeta ha sufrido el impacto de asteroides. Hemos sido golpeados por unos treinta planetas pequeños, de hasta 16 kilómetros de diámetro, que viajaban a una velocidad de seis veces la del sonido.

Estos impactos liberan una cantidad de energía equivalente a unos miles de veces la energía que sería liberada si todas las cabezas nucleares estacionadas en los almacenes de armas actuales explotasen al mismo tiempo. Estos acontecimientos producen algo más que cráteres de 320 kilómetros; pueden destruir hasta el 90 por ciento

de todos los organismos vivos, desde los microscópicos hasta los macroscópicos.

Los impactos hacen sonar la Tierra como una campana, y las reverberaciones del acontecimiento resuenan, metafóricamente hablando, a lo largo de todos los sistemas de la Tierra por un período de quizás un millón de años o más. La historia de nuestro planeta está marcada por estas perturbaciones; a partir del registro de las mismas podemos aprender mucho sobre cómo funciona el sistema y cómo se reestablece la homeostasis completa.



3.1. Mapa del Canadá donde se muestran los cráteres producidos por impactos de meteoritos.

Si se duda de que la Tierra haya sido golpeada tan a menudo, basta con mirar el mapa de distribución de cráteres en las antiguas capas rocosas del Canadá (figura 3.1). Es como echar un vistazo a una región de la superficie lunar.

Sin embargo, en la mayor parte de las áreas continentales, y en toda la superficie del fondo del mar, la rapidez de los procesos de erosión allanadores y la expansión del fondo oceánico ocultan rápidamente la evidencia de todos los impactos, excepto los que corresponden a los más recientes.

No todos los acontecimientos catastróficos son producidos por causas externas; algunos, como la aparición de oxígeno en forma de gas, son generados por tensiones internas inherentes al sistema, y pueden ser comparados a las crisis de los organismos vivos, tales como la pubertad, la menopausia o la metamorfosis de una oruga en mariposa. El registro de las rocas, aunque difuminado por el tiempo y a menudo incompleto, todavía preserva alguna evidencia del estado físico y químico de la Tierra y de la distribución de especies antes y después de cada una de estas perturbaciones.

Sin embargo, desenredar el registro es como intentar encontrar trazas de la identidad de un terrorista a partir de los escombros del edificio que su bomba ha destruido.

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

Desde la certeza de sus conocimientos en biología dicen que nunca podría existir un organismo tan grande y, tal como lo ven, tan estable. Pienso que esta crítica es dogmática, y, como vimos en el capítulo anterior, fácilmente rebatible. El modelo simple del mundo de las margaritas ilustra cómo podría funcionar Gaia. Partíamos de un mundo imaginario que gira como la Tierra y que es calentado por una estrella gemela a nuestro Sol durante su movimiento orbital.

En este mundo, la competición por el territorio de dos especies de margaritas, una oscura y la otra clara, da lugar a una regulación

exacta de la temperatura planetaria en el nivel apropiado para el desarrollo de estas plantas. No es necesaria ninguna previsión, ni planificación, ni propósito preestablecido. El mundo de las margaritas es una aproximación teórica a un planeta en homeostasis. Ahora podemos empezar a pensar en Gaia como una teoría, algo más que el simple «supongamos» de una hipótesis.

En el mundo de las margaritas hay mucho más que una respuesta a una crítica. Lo desarrollé, en primer lugar, con este propósito, pero cuando avanzaba en su planteamiento percibí que, además de las cuestiones acerca de Gaia, era una fuente de investigación y una respuesta a preguntas relativas a la ecología teórica y el darwinismo. Una propiedad importante del modelo es su docilidad y estabilidad en términos matemáticos.

Cuando lo desarrollé comprobé que el número de especies que se puede incluir en él sólo parece estar limitado por la capacidad de los ordenadores utilizados y por la paciencia del investigador.

Independientemente de los detalles, los procesos de realimentación ambientales estabilizan el sistema de ecuaciones diferenciales que describe el crecimiento y la competición entre especies. Una gran parte de lo que sigue a continuación es el relato de mis exploraciones en el mundo de las margaritas, un informe de mis descubrimientos en él. He considerado que la mayoría de mis lectores no se sienten motivados por las expresiones matemáticas y, por tanto, no las incluyo. Para los que crean que cualquier teoría que no sea expresada en el lenguaje puro de las matemáticas es inadecuada, Andrew Watson y yo hemos descrito las matemáticas del mundo de estas plantas en nuestro trabajo en Tellus.

La estabilidad de dicho mundo no depende en ningún modo de una selección precisa de condiciones iniciales, o de tasas de crecimiento, y, tal como veremos en los últimos capítulos, el modelo es general en su aplicación.

Algunos de los diagramas utilizados para ilustrar la geofisiología del modelo planetario pueden ser difíciles de seguir para lectores no familiarizados con esta forma de expresión gráfica. He escrito este libro para vosotros, o sea que podéis saltaros este capítulo

siempre que ya estéis convencidos de que la teoría de Gaiga proporciona una representación bastante aproximada de la Tierra. Sin embargo, pido a mis detractores que lo lean, porque intentaré replicar aquí con detalle a las objeciones que han planteado.

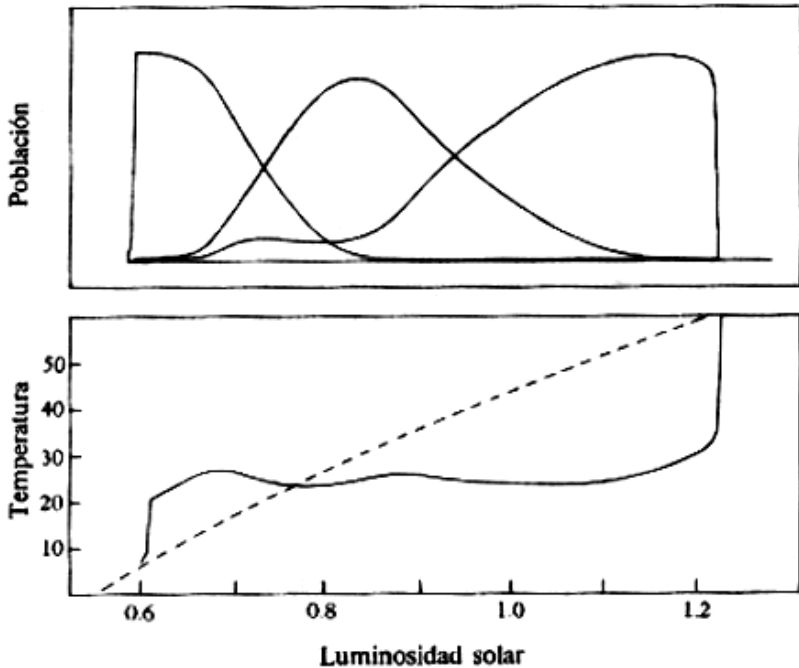
La reacción de los científicos ante el mundo de las margaritas fue reveladora. Los más interesados fueron los meteorólogos y climatólogos y, en segundo lugar, los geólogos y geoquímicos. Los biólogos, con raras excepciones, o bien ignoraron los modelos o siguieron tan escépticos como antes. Una objeción señalada de manera persistente por los biólogos era que, en el mundo real, las margaritas tendrían que usar algo de su energía para fabricar pigmentos, lo que las colocaría en desventaja con respecto a hipotéticas margaritas grises no pigmentadas. No hubiera sido posible la regulación de temperatura en semejante mundo.

Tal como lo expresaron, “las margaritas grises hubieran hecho trampa”.

Animado por sus críticas construí un modelo con tres especies de margaritas. Todo lo que el nuevo modelo requería era una nueva serie de ecuaciones diferenciales para describir la temperatura y crecimiento de la especie de margaritas grises. Se trataba de introducir margaritas de clase media discretamente ataviadas en un mundo de colores extremos.

Atribuí a las margaritas oscuras y claras una rebaja en la tasa de crecimiento de un uno (1%) por ciento por la fabricación de pigmentos. Estoy satisfecho de poder afirmar que el cínico parecer de los biólogos no se ve confirmado por este nuevo modelo. Así se puede observar en la figura 3.2. De nuevo se ha establecido que la luminosidad aumenta desde el 60 al 140 por ciento de la de nuestro Sol. Las poblaciones de margaritas se encuentran en el cuadro superior, con las oscuras a la izquierda, las grises en medio y las claras a la derecha.

El hecho de que las margaritas grises no gasten energía en la fabricación de pigmentos no les sirve de nada cuando su mundo es demasiado caliente o demasiado frío para que crezcan.



3.2. *La evolución del clima en un mundo de margaritas con tres especies: margaritas negras, grises y blancas. A modo de comparación, la línea de trazos del cuadro inferior representa la evolución de la temperatura en ausencia de vida.*

Pero las margaritas negras pueden florecer en el frío y las blancas en el calor. Las margaritas grises proliferan cuando el clima es templado y no se precisa regulación. En otras palabras, las diferentes especies crecen cuando ellas y su medio ambiente están adaptados el uno con el otro.

Para contestar a las críticas hubiera sido suficiente con añadir margaritas grises. Sin embargo, una vez metido en la tarea, encontré que era igualmente fácil hacer un modelo que pudiese acomodar cualquier número de margaritas diferentes, por ejemplo de uno a veinte. Construí entonces un modelo en el que, cualquiera que fuera el número de especies los tonos de las margaritas variasen a incrementos constantes desde los más oscuros a los más claros.

En la figura 3.3 se muestra la evolución de la temperatura, de las poblaciones de margaritas y otras propiedades de un mundo con veinte especies distintas. Como en el modelo de tres especies, se trata de un mundo cuya estrella se calienta a medida que envejece. El cuadro inferior muestra la evolución de la temperatura planetaria; el cuadro intermedio, la evolución de las poblaciones de las diferentes especies y el cuadro superior, la biomasa total y la diversidad del ecosistema representado en el modelo.

La diversidad del ecosistema es tanto mayor cuanto menor es la dificultad. Cuando el calor del Sol es exactamente el adecuado y no hace falta ningún esfuerzo para la regulación de la temperatura, entonces puede coexistir el mayor número de especies. Cuando el sistema se encuentra bajo alguna dificultad, cuando ha empezado a evolucionar o está agonizando, la diversidad es mínima y la población la constituyen casi enteramente las especies más oscuras o más claras.

Efectivamente, si alguna especie está en situación ventajosa en esos períodos es la más oscura o la más clara, pero nunca las grises.

Sin embargo, todavía hay muchos otros aspectos en este nuevo modelo con los que rebatir las críticas de los biólogos más escépticos. Cuando lo armaba aún no conocía la ecología teórica, esa rama de la biología matemática que trata de las interacciones entre las especies de un ecosistema. Como veremos, el mundo de las margaritas proporciona una salida a una ciencia que ha estado coartada durante años por las limitaciones de sus teorías.

En los años veinte, los biomatemáticos Lotka y Volterra introdujeron su famoso modelo de competencia entre conejos y zorros. Era un modelo simple, como el del mundo de las margaritas, pero difería de éste en la medida que el medio ambiente se consideraba infinito y neutral. El crecimiento de conejos o zorros no afectaba al medio ambiente, y no se permitían cambios ambientales que pudiesen afectar a sus poblaciones.

El significado de las dos ecuaciones de este modelo puede expresarse como sigue: los zorros aumentan cuando el número de conejos crece, pero los conejos disminuyen cuando el de zorros aumen-

ta. En esta relación hay un punto estable donde las dos especies coexisten en una proporción constante, excepto en el caso de una mala época que mate algunos conejos. Efectivamente, cualquier cambio de población que no provenga del interior del mismo modelo condena a este mundo simple a una fluctuación cíclica y nunca puede volver a una relación estable.

Observemos cómo ocurre.

Si una epidemia produce la muerte repentina de conejos, a continuación se producirá la muerte de zorros por falta de alimento. Los conejos se reproducen más rápidamente y pronto su población será superior al que había antes de la plaga. Pero ahora los zorros también empiezan a crecer, y la velocidad de crecimiento de los conejos se amortigua y disminuye cuando el incremento del número de zorros los amenaza.

Enseguida los conejos son demasiado escasos para alimentar a los zorros, los zorros mueren y el ciclo empieza de nuevo.

¿Explica este modelo las oscilaciones de población que se observan en la Naturaleza? Sí, lo hace.

Los ecólogos de campo han mostrado que en los ecosistemas simples se producen ciclos de poblaciones, pero al examinarlas más de cerca, nos parece que las observaciones de campo siempre se han realizado en ecosistemas enfermos o preparados por el hombre donde sólo unas pocas especies interaccionan entre sí, y donde sólo se consideran dos especies (por ejemplo plagas atacando la vegetación de un monocultivo agrícola, o enfermedades bacterianas de plantas y animales).

Estos ejemplos de dos especies, en las que las poblaciones siguen ciclos periódicos o fluctúan de una manera caótica e impredecible, pueden ser reproducidos con éxito por los sucesores matemáticos del famoso modelo de zorros y conejos de Lotka y Volterra.

Lo que estos modelos ecológicos y la propia teoría ecológica como ciencia han sido incapaces de explicar es la gran estabilidad de los ecosistemas naturales complejos como las selvas tropicales o, en otras palabras, resolver el acertijo de Darwin:

«¿En qué lugar el viento mueve el tomillo silvestre y crecen las acederillas y la vacilante violeta?».

Los ecólogos han intentado vencer los inconvenientes de sus modelos sencillos incluyendo jerarquías estructuradas de especies que llaman «redes tróficas». En estas jerarquías hay una pirámide en cuya cúspide se encuentra el predador más alto, como por ejemplo el León, que presenta el menor número de individuos. Las poblaciones aumentan a medida que se desciende en cada nivel «trófico», hasta la base de la pirámide en que se encuentran los productores primarios más numerosos, las plantas, que proporcionan alimento para todo el sistema.

A pesar de los años de esfuerzo y el tiempo empleado en el cálculo, los ecólogos no han hecho ningún progreso real en el modelo teórico de un ecosistema natural complejo, como una selva húmeda tropical o el ecosistema tridimensional del océano.

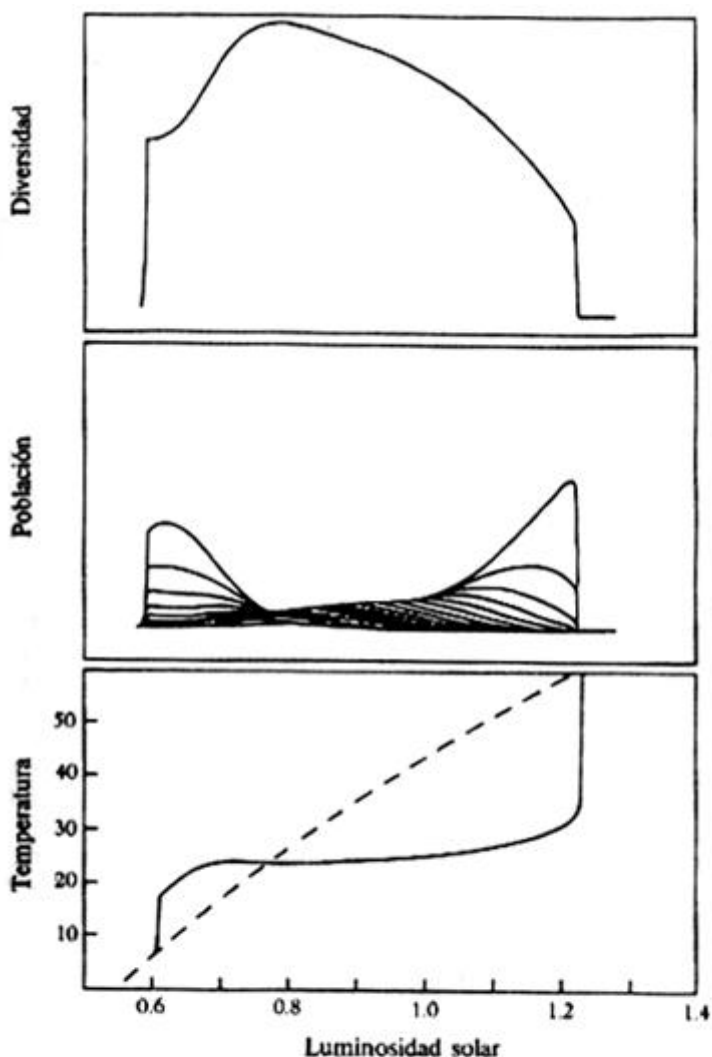
Ningún modelo diseñado desde la ecología teórica puede explicar en términos matemáticos la estabilidad manifiesta de sistemas naturales tan amplios.

En efecto, el distinguido ecólogo, Robert May, en su libro *Theoretical Ecology* [Ecología teórica], escribe en el capítulo titulado «Modelos de ecosistemas con varias especies»:

«Cuando se realizan esta clase de estudios, una gran variedad de modelos matemáticos sugieren que cuando un sistema es más complejo, en el sentido de un mayor número de especies con una estructura más rica, de interdependencias, dinámicamente resulta más frágil... Entonces la generalización matemática sugiere que el incremento de complejidad conlleva fragilidad dinámica en lugar de resistencia».

May sigue escribiendo:

«Ello no quiere decir que en la naturaleza los sistemas complejos deban parecer menos estables que los sencillos. Tanto a un sistema complejo en un medio ambiente caracterizado por un nivel bajo de fluctuaciones aleatorias como a un sistema sencillo en un medio ambiente caracterizado por un nivel alto de fluctuaciones aleatorias, puede correspon



3.3. La evolución del clima en un mundo de margaritas de 20 especies. El cuadro inferior muestra la temperatura planetaria: la curva a trazos corresponde a una situación en ausencia de vida y la línea continua a la presencia de margaritas. El panel central muestra las poblaciones de 20 margaritas de colores diferentes, con las más oscuras que aparecen antes (izquierda) y las más claras al final (derecha). En el cuadro superior se muestra cómo la diversidad tiene un valor máximo cuando la temperatura del sistema está lo más cerca posible del valor óptimo de temperatura.

derles la misma probabilidad de sobrevivir, cada uno teniendo la estabilidad dinámica apropiada a su medio ambiente... Una conclusión general importante es que las grandes e inauditas perturbaciones impuestas por el hombre serán probablemente más traumáticas para los ecosistemas complejos que para los sencillos. Ello invierte el punto de vista inocente, aunque bien intencionado, de que "complejidad conlleva estabilidad" y su moraleja asociada de que tendríamos que preservar, e incluso crear, ecosistemas complejos como tampones contra las agresiones del hombre. Yo diría que los ecosistemas naturales complejos que se encuentran amenazados en las zonas tropicales y subtropicales son menos capaces de aguantar nuestros azotes que los sistemas relativamente simples de las zonas templadas y boreales».

Esta negación reconoce la estabilidad de los ecosistemas complejos en el mundo real. Sin embargo, deja la impresión de que la diversidad es, en general, una desventaja, y que la naturaleza, no teniendo en cuenta las elegantes matemáticas de la biología teórica, de alguna manera ha hecho trampa.

Evidentemente si hubiera conocido estos trabajos nunca hubiera intentado desarrollar algo tan tonto como un modelo con veinte especies de margaritas. Afortunadamente para mí fui educado en aquella escuela científica que propone la lectura de los libros científicos mucho después de haber realizado los experimentos.

Entonces, ¿qué es lo que confiere la gran estabilidad y ausencia de cualquier comportamiento cíclico o caótico a los modelos del mundo de las margaritas?

La respuesta es que las margaritas nunca pueden crecer de manera incontrolada; si lo hacen, el ambiente se hace desfavorable y se acota el crecimiento. De manera semejante, el medio ambiente no puede desplazarse hacia estados desfavorables en presencia de las margaritas; el crecimiento en respuesta de las margaritas del color apropiado lo evita. Es el acoplamiento estrecho entre estas relaciones, que condiciona tanto el crecimiento de las margaritas como la temperatura planetaria, lo que hace que el modelo funcione.

Quizá nuestra experiencia puede representarse mediante la metáfora de que la familia y la sociedad funcionan mejor cuando existen reglas firmes, pero aplicadas en su justa medida, que cuando existe una libertad ilimitada.

Interesado en ver si estas interpretaciones eran correctas construí un mundo de margaritas adicional. En éste, las margaritas eran comidas por conejos y los conejos a su vez eran comidos por zorros, una combinación del modelo de Lotka y Volterra con el mundo de las margaritas. Para evaluar la estabilidad de este modelo más complejo lo sometí a catástrofes periódicas; en cuatro ocasiones durante la evolución del modelo, el 30 por ciento de la población de margaritas fue destruida inmediatamente, como por una epidemia, y el sistema permitió que se recuperaran (figura 3.4).

Sorprendentemente, ni la adición de herbívoros ni las plagas afectan seriamente a la capacidad de las margaritas para regular el clima. Durante el curso normal de la evolución todas las poblaciones son estables y se recuperan pronto de las perturbaciones de las epidemias. Finalmente, el sistema ya no puede compensar el siempre creciente flujo de energía solar y se pierde. Como es de esperar, cuanto más cerca se encuentra del final más grande es el efecto de las perturbaciones.

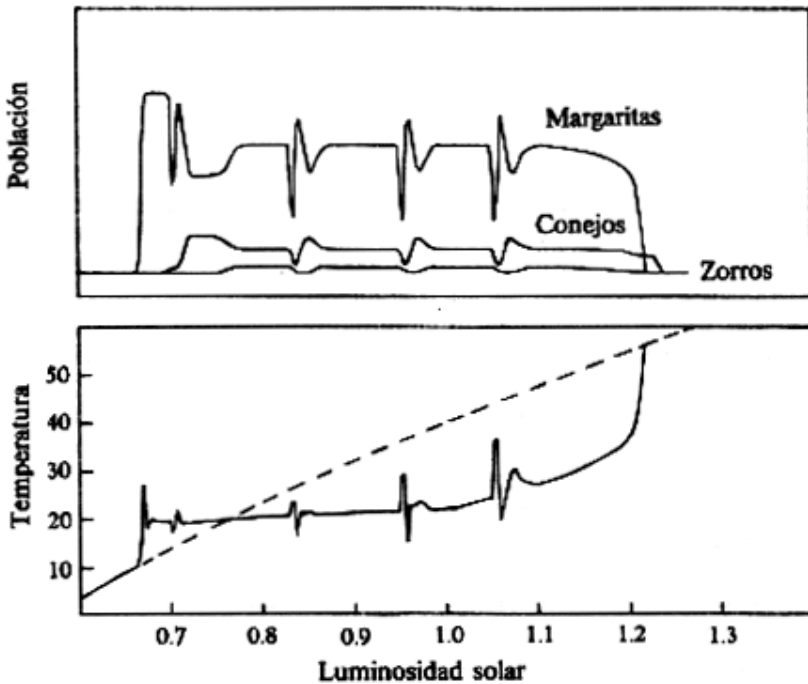
La diferencia entre el punto de vista geofisiológico y el ecológico reside en la interpretación de la perturbación. El geofisiológico entiende la temperatura, la lluvia, el aporte de nutrientes, etcétera, como variables que pueden ser modificadas. Desde su punto de vista el sistema gaiano evoluciona junto con su medio ambiente químico y físico y está bien capacitado para afrontar cambios de esta naturaleza.

Por ejemplo, las selvas de los trópicos húmedos están generalmente bien provistas de agua y sombra gracias a su cubierta de nubes; durante su existencia nunca se encuentran sometidas a una sequía prolongada como en una región desértica.

Por el contrario, los ecólogos teóricos ignoran el medio ambiente físico y químico. Para ellos el medio ambiente significa el conjunto mismo de especies, y un nicho es una parte de territorio negociado

entre las especies como si uno pudiera mirar indistintamente el medio ambiente de Suiza para comprender la gente de Italia, Francia y Alemania. Desde este punto de vista las perturbaciones consisten en competencia o guerras.

La invasión humana de una selva tropical con sierras mecánicas, y el consiguiente cambio de la masa forestal por ecosistemas agrícolas, es un hecho traumático. Es como destruir el ecosistema del modelo de las margaritas y reemplazarlo con un solo monocultivo de especies negras. Tanto en el mundo de las margaritas como en las selvas, este hecho podría conducir a una muerte prematura por sobrecalentamiento, especialmente si tiene lugar en un tiempo o en un lugar en que el Sol está caliente.



3.4. El mundo de las margaritas con conejos y zorros, perturbado por cuatro epidemias que mataron el 30 por ciento de las margaritas en cada caso.

Los geofisiólogos y los ecólogos están de acuerdo en que los ecosistemas complejos no se recuperarán fácilmente de agresiones como ésta; en lo que difieren es en la evaluación de la estabilidad del monocultivo, o de la única especie de margaritas. La geofisiología dice que estos ecosistemas tienen una capacidad limitada de interaccionar con su ambiente físico, y por tanto son incapaces de mantener su medio ambiente cuando están expuestos a una perturbación grande.

Los trópicos húmedos han permanecido arbolados a pesar de cambios en el clima de la Tierra que en términos humanos pueden ser considerados como grandes, pero que son triviales a escala planetaria. La presencia de una gran diversidad de especies ayuda a esta gran capacidad para soportar el cambio climático.

En la mayoría de ejemplos del mundo de las margaritas se ha mostrado que el Sol aumenta constantemente su producción de calor, una perturbación externa que aumenta incesantemente su intensidad hasta que la vida ya no puede continuar. Una manera alternativa de ilustrar el mundo de las margaritas consiste en permitir que la vida transcurra normalmente a una intensidad constante de luz solar y entonces introducir súbitas perturbaciones tales como un cambio en el clima o alguna catástrofe como una epidemia o el impacto de un asteroide.

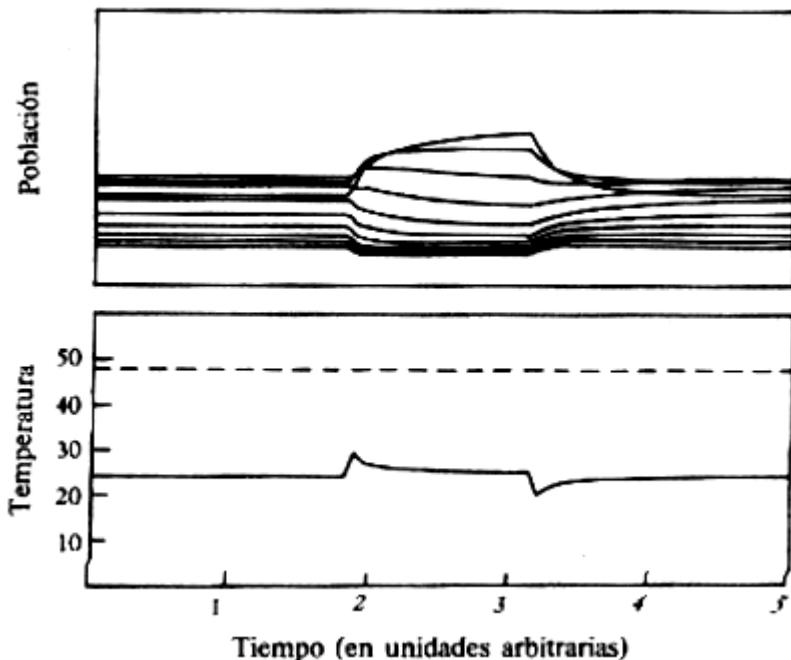
Así, en la figura 3.5 se muestra un mundo de margaritas con 10 especies coloreadas cuya existencia estable es alterada de pronto por una epidemia que mata el 60 por ciento de las margaritas sin reparar en el color.

En el cuadro inferior, la línea a trazos representa la temperatura planetaria en ausencia de margaritas, a 40 °C se encuentra el límite para la vida. La línea continua muestra el clima con las margaritas presentes antes, durante y después de la perturbación. La temperatura se mantiene a unos 25 °C excepto cuando la epidemia golpea por primera vez la población de margaritas.

Cuando la perturbación cede el sistema rápidamente recupera el statu quo. El cuadro superior muestra la variación en la distribución de especies antes, durante y después de la catástrofe.

Aún bajo esta perturbación el sistema es reacio a desplazarse lejos del estado óptimo que existía antes del cambio. El efecto más notorio de la alteración se manifiesta en la distribución de las diferentes especies de margaritas.

La respuesta rápida del mundo de las margaritas al cambio requiere una realimentación positiva e implica el crecimiento explosivo de las especies cuya interacción con el clima es más favorable.



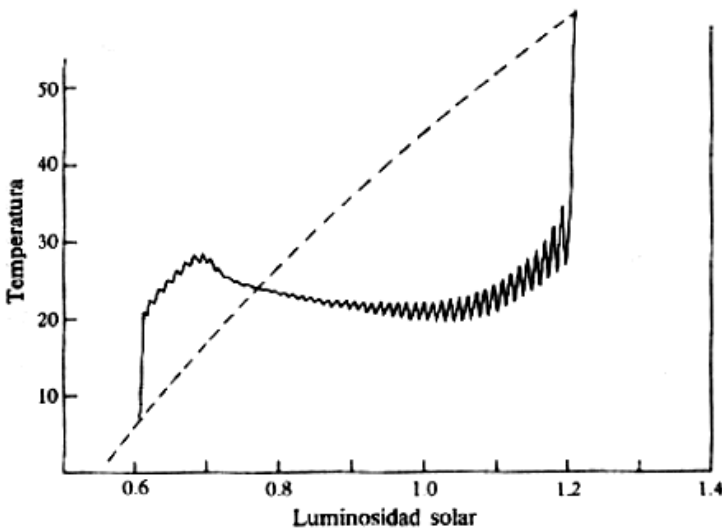
3.5. Efecto en el clima de una plaga que mata el 60 por ciento de las margaritas en un mundo en que la luminosidad solar se mantiene a intensidad constante. Obsérvese cómo se recupera la homeostasis tanto en la población como en la temperatura durante y después de la perturbación.

Este modelo contiene 10 especies de margaritas distribuidos en un intervalo de colores uniforme y fijo desde el oscuro al claro.

Las mutaciones y la posibilidad de cambios evolutivos entre las especies constituyen un factor adicional a tener en cuenta. En este sentido, el cambio abrupto de la distribución de especies observado en el momento de la perturbación y de nuevo al final de la misma refleja la intensidad de la presión de selección en estos momentos. El modelo está fundamentalmente de acuerdo con las observaciones de Stephen Jay Gould y Niles Eldredge sobre la evolución puntuada.

En lugar de cambios estables y graduales, como en el punto de vista darwiniano convencional, hay períodos de evolución abrupta y rápida: las puntuaciones. La teoría de Gaia esperaría que la evolución del medio ambiente químico y físico y de las especies se produjera conjuntamente.

Habría períodos largos de homeostasis, con cambios pequeños en el medio ambiente y en la distribución de las especies, que serían interrumpidos por cambios súbitos de ambos órdenes.



3.6. El efecto de una plaga periódica de intensidad constante sobre la capacidad de las margaritas para controlar el clima. Obsérvese

cómo se amplifica el efecto de perturbación de la plaga en los momentos de máxima presión cerca del principio y del final de la vida del mundo de las margaritas.

El incremento de la amplitud de las oscilaciones en la última parte de la curva recuerda la evolución de las series actuales de períodos glaciares e interglaciares.

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

Los experimentos de perturbación y de cambio progresivo pueden ser combinados en uno solo, tal como se muestra en la figura 3.6. Aquí nuestro mundo de 10 especies de margaritas evoluciona como al principio, pero ahora se produce una epidemia que afecta de forma recurrente a todos los colores de la misma manera. La plaga mata al 10 por ciento de las margaritas; que se permite que se recuperen para a continuación ser víctimas de una nueva forma de virus. Y así continúa el ciclo a lo largo de toda la evolución del modelo.

Este experimento ilustra de qué modo la estabilidad, medida como la capacidad para regular el clima, está correlacionada con la diversidad. Las fluctuaciones de temperatura son máximas en los momentos cercanos al nacimiento y la muerte del mundo de las margaritas, cuando el número de especies es mínimo. En la flor de la vida, el efecto de las perturbaciones se resiste de forma casi completa.

Volveremos a este experimento en el capítulo 6, en relación con la capacidad actual de regulación de temperatura del biota mediante sus posibilidades de modificación de la concentración de dióxido de carbono en el aire. Este sistema específico de control climático se encuentra cerca del final de su capacidad de trabajo y se puede argumentar que las oscilaciones climáticas recientes entre edades glaciares e interglaciares son como la parte final del registro del mundo de las margaritas de la figura 3.6.

Las perturbaciones relativamente pequeñas de la oscilación orbital de la Tierra producen pequeñas variaciones en la cantidad de calor recibida por el Sol que resultan amplificadas debido a la inestabilidad de un sistema moribundo. Estos argumentos no son necesariamente aplicables a las glaciaciones ocurridas en un pasado más remoto, probablemente debidas a causas diferentes.

Los modelos del mundo de las margaritas que acabo de describir son completos pero están expresados en un lenguaje llano. Muchos científicos encuentran insatisfactoria semejante forma de expresión de una teoría y prefieren el «rigor» de las expresiones matemáticas formales. En su honor, en la figura 3.7 se muestra la esencia del modelo del mundo de las margaritas mediante un sencillo diagrama que ha elaborado mi amigo y colega Andrew Watson.

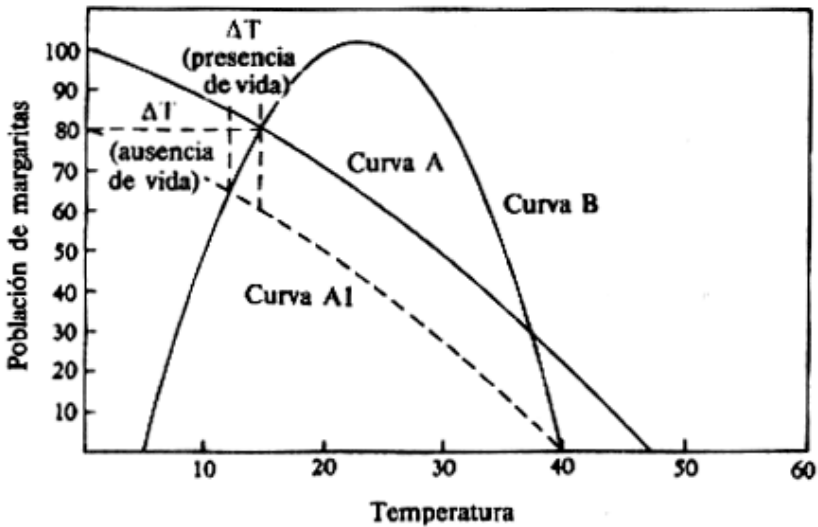
Este modelo está basado en un mundo de margaritas que sólo contienen margaritas blancas. Como son más claras de color que el suelo en el que viven tienden a incrementar el albedo de su localidad que, en consecuencia, es más fría que las áreas de superficie desnuda. Las margaritas influirán en la temperatura media del planeta desde las zonas que recubran. La relación entre el área cubierta por margaritas blancas y la temperatura superficial media del planeta se muestra mediante la curva A.

La línea de trazos paralela (A1) muestra cómo se puede desplazar la relación si hubiese algún cambio en alguna variable externa que influyese en la temperatura planetaria -por ejemplo si la estrella que calentaba el mundo de las margaritas disminuyese su aporte de energía radiante.

Las margaritas crecen mejor en un margen de temperaturas restringido. El crecimiento es máximo cerca de 20 °C y cae a 0 por debajo de 5 °C y por encima de 40 °C. La relación entre temperatura superficial del planeta y población estacionaria de margaritas sería como en la curva B, la curva parabólica.

3.7. Regulación mediante margaritas blancas. La curva parabólica (B) describe la respuesta de las margaritas a la temperatura, y las curvas A y A1 son la respuesta de la temperatura planetaria al área cubierta por las margaritas.

La curva A1 corresponde a un menor flujo de calor de la estrella. En ausencia de margaritas, el incremento en la temperatura planetaria (ΔT) sería cercano a 15 °C mientras que en presencia de éstas sólo representa alrededor de 3 °C.



Las curvas A y B relacionan la temperatura planetaria con la población del mundo de las margaritas en un estado estacionario, y el estado estacionario de todo el sistema viene indicado por el punto de intersección de estas dos curvas.

En el ejemplo puede observarse que hay dos soluciones estacionarias posibles. Resulta que las soluciones estables se encuentran en las intersecciones donde las tasas de cambio de la población y la temperatura tienen direcciones opuestas. En términos matemáticos, cuando las derivadas de las dos curvas tienen signos opuestos. La otra intersección no da lugar a una solución estable. Si el mundo de las margaritas empieza en alguna temperatura arbitraria, pero tolerable, se desplazará hacia el punto de intersección superior y se asentará allí.

¿Qué le ocurre a este estado estacionario cuando se produce algún cambio en el medio ambiente exterior?

Supongamos, por ejemplo, que la estrella se calienta tal como nuestro Sol lo hace. Si la población de margaritas se mantuviese constante de manera artificial, la temperatura planetaria acusaría simplemente el cambio en el flujo de calor de la estrella; sobrevendría un cambio de temperatura mucho más importante que si se deja crecer las margaritas hasta su nuevo estado estacionario natural, desde donde se opondrían al efecto provocado por el cambio en la radiación.

En este modelo se dan por sentados muy pocos supuestos. No es necesario aceptar que las margaritas tengan clarividencia o capacidad de previsión. Basta suponer que el crecimiento de las margaritas puede afectar a la temperatura planetaria y viceversa. Es interesante observar que el mecanismo funciona igualmente bien cualquiera que sea la dirección de los efectos. Las margaritas negras también hubieran dado lugar al mismo fenómeno. Todo lo que hace falta es que cuando están presentes el albedo sea diferente del que corresponde al suelo yermo.

La hipótesis de que el crecimiento de las margaritas está limitado a un margen estrecho de temperaturas es crucial para el funcionamiento del mecanismo, pero esta limitación dentro de un margen estrecho también se observa en toda especie viva. La curva de crecimiento con punto óptimo (B) también se observa en otras variables además de la temperatura, por ejemplo el pH (puede ser muy ácido o muy alcalino, pero es preferible la neutralidad). La mayoría de nutrientes también experimenta restricciones similares; demasiado es veneno, demasiado poco produce muerte por inanición.

La elección de una relación parabólica para la respuesta del crecimiento de las margaritas ante la temperatura es arbitraria, y hay gente que sugiere que en la vida real esta relación adquiere formas diferentes o más complejas. Para evaluar el efecto de esta observación el modelo del mundo de las margaritas se ha calculado mediante relaciones diferentes entre crecimiento y temperatura.

Todos ellos mantenían el límite de 5 a 40 °C, pero comprendían una variedad de tipos que iban desde uno rectangular (un crecimiento constante a todas las temperaturas) a uno triangular (un incremento lineal hasta un máximo y luego una pérdida lineal de la misma pendiente). También se escogieron relaciones semicirculares y rómbicas. La única limitación resultante de estos cálculos consistió en la inestabilidad de los modelos cuando aparecía una parte horizontal en las relaciones.

Volvamos atrás a la figura 3.7 e imaginemos que la curva parabólica se sustituye por una en forma de sombrero recto. La sección horizontal, o parte superior del sombrero, implicaría la existencia de un crecimiento constante a cualquier temperatura dentro del intervalo de 5 a 40 °C, en consecuencia no podría haber ninguna regulación de la temperatura. Estos modelos son parecidos a los modelos de competencia simple de la biología de poblaciones que, al ignorarse el medio ambiente, resultan notoriamente inestables.

En la medida que la velocidad de crecimiento de las margaritas varíe con la temperatura hasta un máximo y luego decrezca, se obtiene un modelo que funciona, incluso en los casos de curvatura suave en la parte superior del semicírculo.

En la Naturaleza, las relaciones que enlazan el crecimiento con alguna variable ambiental frecuentemente consisten en la combinación de un crecimiento logarítmico sobrepasado por una caída logarítmica. En los capítulos 5 y 6 estas relaciones forman parte del modelo para la regulación del oxígeno atmosférico. Cuando aumenta la concentración de oxígeno aumenta el crecimiento de los consumidores, pero el exceso de oxígeno es venenoso. Tanto demasiada abundancia como demasiada escasez de oxígeno son malas; existe una cantidad que es la deseable.

El mundo de las margaritas difiere profundamente de los intentos anteriores de modelar las especies o la Tierra. Es un modelo como los de la teoría de control, o cibernética, como también se le llama. Estos modelos consisten en sistemas autorregulados. Los ingenieros y los fisiólogos los utilizan para diseñar los pilotos automáticos de los aviones o para comprender el sistema de regulación de la

respiración en los animales, y conocen qué partes del sistema deben estar estrechamente acopladas para que funcione.

En su lenguaje, el mundo de las margaritas es un sistema de bucle cerrado. Los aparatos que no están autorregulados son a menudo inestables. Los ingenieros se refieren a ellos como de «bucle abierto», los bucles son los enlaces de realimentación entre las partes del sistema. Sin embargo, el mundo de las margaritas no tiene una forma idéntica a un aparato de ingeniería. Una diferencia clave consiste en la falta de «puntos fijos» (lo cual quizá también es característico de Gaia). En los sistemas manufacturados, el usuario fija la temperatura, la velocidad, la presión o cualquier otra variable.

El valor escogido es el punto fijo y el objetivo del sistema es mantener ese valor si el medio ambiente externo cambia. El mundo de las margaritas no tiene ningún objetivo establecido como un punto fijo, sólo se sienta, como un gato, en una posición confortable y resiste los intentos de desalojarlo.

Debido al tribalismo que aísla a los seguidores de las disciplinas científicas, los biólogos, que hacen modelos del crecimiento competitivo entre especies, decidieron ignorar el medio ambiente físico y químico. Los geoquímicos, que hacen modelos de los ciclos de los elementos, y los geofísicos, que modelan el clima, decidieron ignorar la dinámica de interacción entre las especies.

En consecuencia sus modelos son incompletos, independientemente del grado de detalle que contengan. Es como si, en la figura 3.7, se considerase la biología de la relación entre población de margaritas y temperatura, pero sin referencia a la biofísica complementaria de las relaciones entre temperatura y población de margaritas. Un ingeniero o un fisiólogo identificarían que semejante planteamiento es un «bucle abierto», y en consecuencia de poco valor, excepto para estudiar casos extremos y patológicos.

También hay algo patológico en la arrogancia de algunos científicos que presumen de su conocimiento especial y de su desdén por otras disciplinas científicas. Hace sesenta años que el biólogo teórico americano Alfred Lotka, juicioso y de mente abierta, des-

cribió el modelo de competencia entre conejos y zorros en *The Elements of Physical Biology* [Los elementos de la biología física]. Desde entonces este modelo ha sido la inspiración de incontables investigadores en biología de poblaciones. Sin embargo ninguno hizo caso de su advertencia en la página 16:

«Debe hacerse hincapié en este hecho. Se acostumbra a discutir sobre la "evolución de las especies". A medida que avancemos veremos muchas razones por las que siempre deberemos considerar la evolución del sistema como un todo (organismos y medio ambiente). En una primera impresión puede parecer que ello dará lugar a un problema más complicado que la consideración de sólo una parte del sistema. Sin embargo, a medida que progresamos se verá que las leyes físicas que gobiernan la evolución toman con toda probabilidad una forma más sencilla cuando se refieren al sistema como un todo, en lugar de a cualquier parte del mismo».

Desde entonces, durante tres generaciones, los ecólogos teóricos han reproducido mediante modelos la evolución de los ecosistemas ignorando el medio ambiente físico, y tres generaciones de biogeoquímicos han reconstruido modelos de los ciclos de los elementos sin incluir siquiera los organismos como una parte dinámica y sensible del sistema.

En tiempos de Alfred Lotka la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales era una tarea amedrentadora, incluso para modelos simples como el mundo de las margaritas. En la actualidad, con la disponibilidad de los ordenadores no hay necesidad de circunscribirse a los límites estrechos de una única disciplina científica.

La visión de Lotka, según la cual el modelo sería más sencillo con todo el sistema que con cualquier parte de él, está ampliamente confirmada por las matemáticas modernas. Los sistemas de ecuaciones del tipo que describen sistemas modelo en ecología teórica y biogeoquímica son conocidos por su comportamiento caótico, tanto que ahora parecen más interesantes como objetos de juego, o para una nueva forma de ilustración gráfica.

Cuando están limitadas a una sola disciplina las matemáticas de los fenómenos naturales pueden convertirse en algo tan intrincado y complejo que a cada nuevo nivel investigado se abre un mundo nuevo de abstracción, todos ellos llenos de color. Es una pequeña maravilla que los usuarios de estas disciplinas imaginen que en sus mundos imaginarios vislumbran parte del mundo real mientras que, de hecho, están perdidos en el mundo fractal de un conjunto de Mandelbrot que reaparece siempre a cualquier nivel, desde menos a más infinito.

La ilusión es animada por matemáticos profesionales que encuentran semejanzas entre sus teorías matemáticas y las patologías del mundo real, y de numerosos científicos matemáticos actuales cuya contemplación de los demonios del hiperespacio -los «atractores extraños» del caos- es mucho más seductora que el mundo aburrido y viejo de la naturaleza.

El mundo de las margaritas proporciona una explicación plausible de cómo trabaja Gaia y de por qué predicción y previsión no son necesarias para la regulación planetaria. Sin embargo, ¿qué evidencia tenemos del mecanismo práctico? ¿Qué predicciones de la teoría de Gaia han sido confirmadas?

La primera prueba fue la expedición Viking a Marte. Aquella exploración confirmó la predicción, hecha a partir de análisis atmosféricos mediante astronomía infrarroja, de que Marte era un planeta sin vida.

Michael Whitfield, Andrew Watson y yo predijimos que la regulación a largo plazo del dióxido de carbono y del clima transcurre mediante el control biológico de la erosión de las rocas. Estas y otras pruebas se describen en los siguientes capítulos. Tiene poca importancia si la teoría de Gaia es correcta o equivocada; ya está proporcionando un punto de vista nuevo y más productivo acerca de la Tierra y de los demás planetas.

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

1. La vida es un fenómeno a escala planetaria. A esta escala es casi inmortal y no tiene necesidad de reproducirse.

2. Los organismos vivos no pueden ocupar un planeta parcialmente. Sería algo tan poco duradero como un animal a medias. La regulación del medio ambiente requiere la presencia de un número suficiente de organismos vivos. Cuando la ocupación es parcial las fuerzas inevitables de la evolución física y química pronto lo convertirían en inhabitable.

3. Nuestra interpretación de la gran visión de Darwin ha cambiado. Gaia llama la atención sobre la falibilidad del concepto de adaptación. Ya no es suficiente decir «organismos mejor adaptados que otros tienen más probabilidad de dejar descendencia». Es necesario añadir que el crecimiento de un organismo afecta a su medio ambiente físico y químico, por tanto la evolución de las especies y la evolución de las rocas están estrechamente ligadas como un proceso único e indivisible.

4. La ecología teórica se ha ampliado. Tomando conjuntamente las especies y su medio ambiente físico como un solo sistema, por primera vez podemos construir modelos ecológicos que son matemáticamente estables y que sin embargo incluyen un gran número de especies en competición. En estos modelos el incremento de la diversidad entre las especies da lugar a una mejor regulación.

Este último punto supone, además, una razón poderosa que justifica nuestra cólera instintiva sobre la desconsiderada supresión de especies, una respuesta a los que dicen que es algo puramente sentimental. Ya no tenemos que justificar la preservación de la rica variedad de especies en los ecosistemas naturales, como los de las selvas tropicales húmedas, mediante débiles razones humanistas como que, por ejemplo, podrían contener plantas con principios activos capaces de curar enfermedades humanas.

La teoría de Gaia nos hace cuestionar si estos ecosistemas ofrecen mucho más que esto. Mediante su capacidad de evaporar grandes volúmenes de vapor de agua a través de la superficie de sus hojas, los árboles sirven para mantener húmedos los ecosistemas de los trópicos y el planeta frío, proporcionando una sombra de nubes blancas reflectantes.

Su sustitución por áreas de cultivo podría precipitar un desastre regional de consecuencias globales.

6°

EL ARCAICO

Al principio no había nada, ni siquiera espacio o tiempo.

(John Gribbin, Genesis)

La vida empezó hace mucho tiempo. La fecha de este acontecimiento no se conoce, por lo menos ocurrió tres mil seiscientos millones de años antes de que nacióramos. Los números tan grandes como estos son anestésicos y paralizan la imaginación.

Es necesaria una escala diferente de tiempo para llegar a las bacterias, nuestros primeros abuelos. En ciencia, la manera usual de domesticar números tan monstruosos consiste en expresarlos en potencias de diez. Hacer cada paso diez veces mayor o menor que el anterior. Nigel Calder describe la historia de la Tierra de esta manera en su libro *Timescale: An Atlas of the Fourt Dimension* [Escala de tiempo: Un atlas de la cuarta dimensión].

Nos recuerda qué fácil es que esta transformación logarítmica nos impida darnos cuenta del tiempo tan largo en que la vida ha ocupado la Tierra. Decir que la vida empezó hace $3,6 \times 10^9$ no nos sirve. En una escala lineal de medida, el origen de la vida es mil veces más remoto que el origen del hombre. En este libro utilizaré una escala de eones, que representa miles de millones de años. La vida empezó por lo menos hace 3,6 eones, durante un período que los geólogos llaman el Arcaico.

El período que comprende desde la formación de la Tierra, hace 4,5 eones, hasta el período en que el oxígeno empezó a dominar la química de la atmósfera, hace 2,5 eones.

Gaia es tan vieja como la vida. Efectivamente, si el Big Bang tuvo lugar hace 15 eones, entonces es tan vieja como un cuarto de la edad del universo. Es tan vieja que su nacimiento se produjo en la

región del tiempo donde la ignorancia es un océano, y el territorio del conocimiento se limita a pequeñas islas. En este capítulo te invito, lector, a unirme a mí para especular acerca de la niñez de Gaia y los problemas que tuvo que abordar cuando se hizo cargo de su herencia, la Tierra. Cuando contemplamos el Arcaico a la luz de la teoría de Gaia, vemos un planeta totalmente diferente a descrito por el conocimiento convencional de la ciencia actual. Es un planeta donde la vida no sólo se adapta a la Tierra, sino que también adapta la propia Tierra para su regeneración y mantener una casa para sí.

La mejor manera de poner de manifiesto la poderosa presencia de Gaia consiste en considerar qué Tierra hubiera existido sin vida. Se dirá que la Tierra actual sería un sitio árido como Marte o como Venus, en los que no ha aparecido la vida. No podemos hacer esta comparación para el Arcaico porque sabemos demasiado poco de la Tierra en esta época.

Por tanto lo que debemos hacer es la mejor estimación posible de las condiciones de la Tierra antes de la vida, y luego considerar los cambios que habría habido cuando la vida se estableció. Preguntándonos cómo era la Tierra antes de que empezase la vida, de alguna manera estamos colgando un trozo de tela neutra y negra antes de que los cambios llenos de colorido provocados por la vida puedan ser claramente observados.

El problema que conlleva hacer esto es que la pieza de tela antigua es tan vieja que se ha enmohecido. Mirar atrás en el tiempo es como usar un telescopio para ver los límites del universo. Podemos ver objetos luminosos débiles. Los astrónomos expresan con argumentos convincentes que la distancia de estos objetos es tan grande que la luz que ahora vemos empezó su viaje hacia la Tierra hace 3,8 eones. Es parecido al tiempo en que los geólogos creen que empezaron a existir las primeras células bacterianas.

Probablemente tienen razón, pero la única certeza de la que disponemos acerca de tiempos y lugares tan remotos proviene de la segunda ley de la termodinámica. De forma enigmática ésta dice que el principio y el final del universo no pueden ser conocidos. A medida que el tiempo y la distancia aumentan, la cara del conocimien-

to, bien definida a su inicio, crece marcada por una cantidad creciente de cráteres de ignorancia. Al final ya no pueden reconocerse los rasgos.

La teoría de la información enseña que, en presencia de una cantidad constante de ruido, la energía necesaria para enviar una señal a través de un intervalo espacial y temporal crece exponencialmente con la distancia que tiene que ser atravesada. En palabras sencillas, cuando la distancia o el tiempo se alargan hace falta mucha más energía para transmitir el mensaje.

Los sucesos de la Tierra de hace sólo 5.000 años están lejos de ser conocidos con certeza. Imaginemos cuán grande debe haber sido una señal para transmitir información acerca del principio del universo hace 15 eones. Esta puede ser la razón que explica por qué la teoría del Big Bang según la cual el universo empezó con una explosión de una partícula inicial es inevitable. Nada excepto la explosión del universo hubiera podido enviar una señal desde hace tanto tiempo.

Todo lo que ahora queda es el débil rumor de las microondas cósmicas de la radiación de fondo. Todas las demás teorías acerca del origen se encuentran faltas de evidencia.

Sin embargo, hay un sistema inteligente de compilar información acerca de acontecimientos tan antiguos como el inicio de la vida que evita la tendencia general de los mensajes a envejecer y morir. Este proviene de la propiedad casi milagrosa de la materia viva para vencer la tendencia amortiguadora del tiempo. Gaia no sólo ha estado viva desde el principio; también ha proporcionado un canal de mensajes químicos libre de ruido sobre aquellos tiempos antiguos.

Si subes a una cima de una colina y gritas no serás oído más allá de un kilómetro. Si usas un altavoz puedes ser capaz de enviar un mensaje a 8 kilómetros. Incluso con la explosión de una bomba H sólo llamarías la atención a una distancia de unos pocos centenares de kilómetros. Un sistema alternativo es decírselo a un amigo, quien tomará el mensaje y lo transmitirá oralmente, de boca en boca.

De este modo el mensaje puede viajar sin dificultad hasta los confines de la Tierra. De manera semejante, los organismos vivos pasan los programas de las células de una generación a la siguiente. Podemos pensar que con toda probabilidad compartimos una química común con la bacteria primitiva más antigua. Las restricciones naturales a la existencia de aquellas bacterias antiguas nos dicen cómo era el medio ambiente de aquella Tierra primitiva. Mediante la transmisión de mensajes codificados en el material genético de las células vivas la vida actúa como un repetidor. En cada generación se recupera y renueva el mensaje de las especificaciones de la química de la Tierra primitiva.

Es un canal de información mucho mejor que el registro de las rocas. Es preciso, aunque desgraciadamente inexacto en la medida que un mensaje que pasa de boca en boca cambia inevitablemente.

Existe un chiste sobre la guerra que esconde una verdad: el mensaje que pasó de boca en boca «Envía refuerzos, vamos a avanzar» (Send reinforcements, we are going to advance) se transformó en «Envía tres o cuatro peniques, vamos a un baile» (Send three and four pence, we are going to a dance). Si queremos conocer los orígenes de la vida a partir de la información genética debemos estar preparados para reconstruir la verdad a partir de errores de este tipo.

Por otra parte, una porción sustancial de la información geológica sobre la Tierra primitiva proviene de otro Big Bang. Tuvo que ser grande para enviar una señal tan lejos. Fue la explosión de una bomba nuclear del tamaño de una estrella, una supernova. Tendemos a olvidar que nosotros, seres excéntricos que utilizamos la combustión como fuente de energía, vivimos en un universo impulsado por la energía nuclear.

Las centrales de energía, las estrellas, han funcionado durante miles de millones de años con una fiabilidad máxima. Sin embargo, del mismo modo que los sistemas más fiables pueden tener un accidente ocasional, algunas estrellas explotan ocasionalmente. Por suerte para nosotros una de ellas lo hizo, y dio lugar a la estrella que ahora tenemos. También por fortuna nuestro Sol no es del tipo

explosivo, no es ni suficientemente grande ni suficientemente viejo.

¿Cómo podemos estar seguros de que el origen de la Tierra está asociado con la explosión de una supernova?

Estamos seguros porque incluso hoy en día la Tierra es radioactiva y también porque la Tierra está constituida de elementos como el hierro, el silicio y el oxígeno que no pueden ser fabricados en el proceso normal de la evolución estelar. En el Sol y en estrellas similares se fusiona hidrógeno para generar helio, y la reacción genera un gran flujo de calor que nos mantiene en un clima templado incluso a 160 millones de kilómetros de distancia. Sin embargo, ningún proceso de fusión ordinario puede dar lugar a elementos como el hierro, y mucho menos como el uranio, que todavía es más pesado. Hace falta mucha energía para fabricar estos elementos.

Alimentar una estrella fusionando hierro para generar uranio es como intentar utilizar hielo en un horno como combustible. No es éste el lugar para exponer detalles concretos sobre la síntesis de elementos en estrellas en explosión; únicamente cabe decir que en un tipo de explosión la parte crucial del suceso es el colapso gravitatorio de la estrella. Las regiones internas soportan la presión fantástica de toda la masa estelar que tiende a caer hacia adentro. En su vida activa, el calor generado por las reacciones nucleares en el centro de la estrella mantiene una presión suficiente para compensar la fuerza gravitatoria hacia adentro.

Es como un cohete espacial en el momento de despegar; el peso del vehículo se aguanta gracias a la ráfaga de la llama. Pero las capas exteriores de la estrella no pueden escapar al tirón gravitatorio y el sistema se hunde cuando se acaba el combustible. Es entonces cuando se produce la síntesis de los elementos pesados. Una parte de ellos es expulsada violentamente cuando explotan las capas exteriores de la estrella que todavía no se han consumido.

Todavía no sabemos cómo se constituyeron el sistema solar y la Tierra como resultado de aquella supernova, ni qué cantidad de su residuo radiactivo pasó a formar parte de nuestro planeta. Sin embargo, la radiactividad es un reloj maravillosamente exacto y ha

medido el tiempo desde aquella explosión hace 4,55 eones. Estamos tan acostumbrados a pensar en la radiactividad como algo artificial que fácilmente ignoramos el hecho de que nosotros mismos somos radiactivos de forma natural.

En cada uno de nosotros se desintegran radiactivamente unos cuantos millones de átomos de potasio por minuto. La energía que impulsa estos pequeños sucesos atómicos explosivos se ha mantenido encerrada en los átomos de potasio desde aquella explosión estelar tan antigua. El elemento potasio es radiactivo pero también es esencial para la vida. Si fuera eliminado y reemplazado por un elemento muy semejante, el sodio, moriríamos instantáneamente. El potasio, como el uranio, el torio y el radio, es un residuo radiactivo de larga vida de la supernova. Cuando los átomos de potasio se desintegran se transforman en átomos de calcio y del gas noble argón.

El uno por ciento de argón que ha contribuido a la formación de la atmósfera, a lo largo de la historia de la Tierra, proviene en su mayor parte de potasio por este mecanismo. En las rocas, los elementos radiactivos uranio y torio están presentes en la concentración de algunas partes por millón. Su velocidad de desintegración es tan lenta que la mayor parte de la cantidad que había originalmente todavía se encuentra en la actualidad, excepto en lo que respecta al uranio 235, que se ha desintegrado en su mayor parte.

El calor generado por la desintegración de los elementos radiactivos es lo que mantiene el interior de la Tierra caliente e impulsa el movimiento de la corteza.

Los registros de las rocas sugieren que la vida empezó entre 0,6 y 1 Eón después de que la Tierra se hubiera agregado en forma de cuerpo planetario reconocible. Estos registros muestran una diferencia en las proporciones de los átomos del elemento estable carbono. Los átomos de carbono existen en la Tierra bajo tres formas: la forma más común pesa 12 unidades atómicas, una proporción pequeña pesa 13 unidades atómicas y se encuentran trazas de carbono radiactivo, que pesa 14 unidades.

Estos átomos de pesos diferentes se denominan isótopos.

La proporción de los isótopos de 12 y 13 unidades atómicas en el carbono de las rocas formadas en ausencia de vida se puede distinguir claramente de la proporción correspondiente al carbono de las rocas acumuladas en presencia de vida..Ello se debe al hecho de que la química de la materia viva segrega los isótopos. Midiendo la composición isotópica de las rocas antiguas es posible distinguir aquéllas que se formaron cuando la vida ya existía de aquellas que se formaron antes. Las rocas que con mayor certeza corresponden a una situación de ausencia de vida no provienen de la Tierra, sino de la Luna y los meteoritos. Su antigüedad es 4.55 eones.

La composición isotópica de estas rocas de materia muerta es fácilmente distinguible de aquéllas sedimentadas en la Tierra hace 3,6 eones. Las rocas sedimentarias más antiguas de la Tierra que se conocen hasta el momento tienen una edad de 3,8 eones, y proceden de un lugar llamado Isua en Groenlandia. Recuerdo al geoquímico alemán Manfred Schidlowski describiendo estas rocas antiguas en una conferencia en 1973, y especulando sobre los átomos de carbono encontrados en su interior, cuya distribución isotópica sugería la presencia de vida.

El período anterior a la vida no ha dejado rocas a partir de las cuales podamos reconstruir los detalles del medio ambiente en que se formaron. Cuatro eones de erosión y desmenuzamiento han borrado el registro. Es posible que haya habido un tiempo de violencia inimaginable, con la caída de asteroides sobrantes de la formación del Sistema Solar (el impacto de un asteroide de sólo 10 kilómetros de diámetro puede dejar un cráter de 320 kilómetros de anchura, y arrojar roca fundida y gas a grandes distancias en el espacio).

Este lapso de tiempo dejó una Tierra tan llena de cráteres como la Luna. Fue el período llamado, de forma acertada, Hadiano es decir infernal.

Sobre la, física y la química del período inmediatamente anterior al origen de la vida sólo pueden hacerse especulaciones. Es interesante contemplar cómo florecen las conjeturas acerca de la historia sorprendente y turbulenta de los principios de la Tierra. Sin embargo, puede comprenderse la dificultad de tejer el trozo de tela negra

neutra al que aludíamos anteriormente. Por tanto, tenemos que hacerlo con la mejor información de que dispongamos, empezando por la atmósfera.

La atmósfera es la cara del planeta y muestra, como muestran nuestras caras, cuál es su estado de salud e incluso si está vivo o muerto. Como vimos en el capítulo primero, la vida planetaria está obligada a utilizar cualquier medio fluido -es decir el aire o los océanos- para el transporte de materiales básicos y el vertido de productos de desecho. El empleo de estos medios fluidos da lugar a alteraciones profundas en su composición química y produce el alejamiento del estado estacionario de cuasi-equilibrio característico de un planeta no vivo.

Dian Hitchcock y yo utilizamos la ausencia de tales alteraciones en la atmósfera de Marte y Venus como evidencia de su carencia de vida mucho antes de que las naves exploradoras Viking y Venera la buscasen y no la encontrasen. Estos planetas muertos son química y visiblemente como un fondo neutro en contraste con el cual la Tierra, planeta vivo, brilla como un zafiro moteado.

Hay muchas razones por las cuales la atmósfera es mejor indicadora de la presencia de vida que el océano o las rocas de la corteza. Esta es una región de transformaciones químicas rápidas bajo la influencia de la luz del Sol. No hay mezcla de gases susceptible de reacción que pueda permanecer mucho tiempo sin alteración en la atmósfera. Si encontramos un gas combustible como el metano junto con oxígeno en una atmósfera iluminada por el Sol, sabemos con certeza que algo lo está regenerando constantemente.

No se podría sacar la misma conclusión a partir de aire aislado en una cueva subterránea. Es la luz del Sol la que constantemente mantiene encendidas todas las combustiones químicas posibles. Por otra parte, la atmósfera tiene la menor masa de todos los compartimientos ambientales con los que la vida se encuentra.

Excepto en lo que se refiere a las pequeñas concentraciones de gases raros, como el argón y el helio, todos los demás gases del aire han existido recientemente como una parte de los sólidos y los líquidos de las células vivas. La atmósfera también tiene un efecto

inmediato tanto sobre el clima como sobre el estado químico de la Tierra, aspectos de crucial importancia para la vida. Un intercambio similar se produce también entre la vida y los océanos y las rocas.

Sin embargo, es mucho más lento y los ciclos de la vida resultan retardados por la existencia de materiales utilizados hace mucho tiempo y ahora desechados.

Justo antes de que se convirtiese en el hábitat para la vida, la Tierra debía ser un planeta muerto cuya atmósfera se encontraba cerca del equilibrio. En este tiempo preciso anterior a la vida, antes de Gaia, la atmósfera debía de estar en lo que los científicos llaman «el estado estacionario abiótico». Esta frase ingeniosa permite distinguir el planeta real -que tiene huracanes y tornados, volcanes y torbellinos- de la ficticia tranquilidad absoluta de un planeta en equilibrio.

Se supone que la Tierra primitiva contenía en su superficie los compuestos químicos a partir de los cuales se formó la vida, compuestos denominados «orgánicos» -tales como los aminoácidos (las subunidades de las proteínas), nucleósidos (las subunidades de las moléculas celulares que transportaban la información genética), los azúcares (las subunidades de los polisacáridos) y muchas otras partes esenciales, todas ellas esperando para el acto final del ensamblaje.

Es importante notar que estas sustancias químicas que consideramos características de la vida, también son producto del estado estacionario abiológico. La mera presencia de estos compuestos en un planeta libre de oxígeno no es por sí misma indicadora de vida. Sólo indica la posibilidad de su formación.

No sólo la química de la Tierra era apropiada para que empezase la vida, el clima también tenía que ser favorable. Algunas rocas antiguas muestran evidencias de haberse formado por sedimentación de partículas. Su estructura laminar sugiere un origen asociado a un lago o a un mar somero y, por tanto, a la presencia de agua libre. La existencia de los compuestos químicos de la vida y pre-vida requiere un intervalo de temperatura entre 0 y 50 °C. Por tanto, la

Tierra no podía estar helada ni podía estar tan caliente como para que hirvieran las aguas.

En un importante trabajo de 1979, tres químicos de la atmósfera y climatólogos, T. Owen, R.D. Cess y V. Ramanathan, publicaron ciertos cálculos para determinar la temperatura media de la Tierra en el momento en que empezó la vida. Utilizaron una idea generalmente aceptada por los astrofísicos, según los cuales las estrellas se tornan más calientes cuando envejecen, y supusieron que la producción de calor del Sol era un 25 por ciento menor que ahora.

Estimaron los valores de la cantidad aproximada de dióxido de carbono gaseoso que había escapado (o emanado) del interior de la Tierra. A partir de aquí fueron capaces de calcular que la temperatura media de la superficie de la Tierra era de 23 °C, que es la característica de los trópicos actuales. Sus cálculos requerían la presencia de una cantidad de dióxido de carbono 200 a 1.000 veces superior a la de ahora.

Un factor importante era la cantidad presente de nitrógeno. Si entonces, como ahora, el nitrógeno era el gas atmosférico principal, la presión de dióxido de carbono más baja sería suficiente. Otro aspecto importante, según mi amiga, la climatóloga Ann Henderson-Sellers, debía de haber sido la distribución de agua en los océanos, nieve, hielo, nubes y vapor de agua. No es sorprendente que el clima existente en el origen de la vida todavía sea objeto de debate.

Los cálculos realizados por el climatólogo R.J. Dickinson en 1987 sugieren que el planeta podría haber sido unos grados más frío; en otras palabras, tal como es ahora.

La idea principal en estos cálculos consiste en que la falta de calor de un Sol más frío podría haber sido contrarrestada por una manta de gas que proporcionara un «efecto invernadero». Los gases con más de dos átomos en sus moléculas presentan la interesante propiedad de absorber el calor radiante, la radiación infrarroja, que escapa de la superficie de la Tierra. Estos gases, tales como el dióxido de carbono, el vapor de agua y el amoníaco, son transparentes a las radiaciones visible e infrarroja cercana, que representan la

mayor parte de la energía del espectro solar. De esta forma el calor radiante penetra en el aire y calienta la superficie.

Estos mismos gases son opacos a la luz infrarroja de longitud de onda larga, que es irradiada por la superficie de la Tierra a la atmósfera inferior. La acumulación del calor, que de otra manera escaparía al espacio, produce el «efecto invernadero», llamado así porque viene a ser lo mismo que el efecto de calentamiento de las paredes de cristal de un invernadero. La primera sugerencia de que un invernadero gaseoso calentó la Tierra fue hecha por el distinguido químico sueco, Svante Arrhenius, en el siglo pasado.

H.D. Holland, en *The Chemical Evolution of the Atmosphere and the Oceans* [La evolución química de la atmósfera y los océanos] da una descripción clara y amena del estado probable de la Tierra justo antes de que Gaia se despertase. En resumen, propone una Tierra con una atmósfera rica en dióxido de carbono, con presencia de nitrógeno pero ausencia de oxígeno, y con trazas de gases como sulfuro de hidrógeno e hidrógeno libre.

Los océanos estaban cargados con hierro y otros elementos; y con compuestos que sólo en ausencia de oxígeno pueden existir en solución. Entre éstos podrían encontrarse especies reducidas de azufre y nitrógeno. La presencia de estos gases y sustancias es importante porque son agentes reductores -fácilmente reaccionan con oxígeno y por tanto lo eliminan-. Esta Tierra habría tenido una amplia capacidad de absorber oxígeno y evitar su aparición en forma libre.

Esta proposición parece tan razonable que la consideraré un hecho y la utilizaré como clave para la comprensión de la evolución del período Arcaico de la historia de la Tierra.

Otro aspecto ambiental ligado a la naciente Gaia consiste en que el planeta producía tres veces más calor interno que ahora. La Tierra era más radiactiva, había pasado menos tiempo desde la supernova que la originó y la desintegración radiactiva todavía era importante. Sin embargo, sería un error suponer que este calor interno habría tenido un efecto apreciable sobre la temperatura de la superficie de

la Tierra. El flujo de calor desde abajo era trivial con relación al calor recibido por el Sol.

El efecto principal de una mayor producción de energía interna sería un vulcanismo más vigoroso, una emanación mayor de gases al aire, y una reactividad mayor de las rocas volcánicas con las aguas del océano. Una de estas reacciones, la que se desata entre el hierro ferroso de las rocas basálticas y el agua, puede producir hidrógeno. La producción continua de hidrógeno tendría dos consecuencias importantes. La primera, el mantenimiento de una atmósfera libre de oxígeno y una superficie favorable para la acumulación de los compuestos químicos de la vida.

La segunda, la pérdida de hidrógeno hacia el espacio. El campo gravitatorio de la Tierra no es suficientemente fuerte para retener los átomos ligeros de hidrógeno. Si la fuga de hidrógeno hubiera continuado, podríamos haber perdido una gran parte de los océanos e incluso llegado al estado árido de Marte y Venus.

Esta fuga no puede ocurrir ahora porque el hidrógeno reacciona bioquímicamente en los océanos y con el abundante oxígeno atmosférico para formar agua. El agua, aunque lleva dos átomos de hidrógeno, es demasiado pesada para escapar directamente al espacio. Otra propiedad que limita la pérdida directa de agua al espacio desde la Tierra es su tendencia a congelarse y caer cuando se forman cristales de hielo en las capas de aire más frías.

Así era la Tierra antes de la vida. Podemos aceptar como razonable que la vida empezó a nivel molecular a partir de procesos equivalentes a las turbulencias y torbellinos. La energía que los impulsaba provenía del Sol y también de la energía libre de una Tierra caliente y joven. Prigogine y Eigen han formulado de manera plausible los mecanismos físicos por los cuales productos químicos y reacciones cíclicas se combinan como estructuras disipativas de la protovida.

La evolución escalonada de la protovida a la primera célula viva mediante un proceso de selección natural no me parece una píldora intelectual muy difícil de tragar. Sería interesante conocer si la pro-

tovida estaba fuertemente asociada a su medio ambiente y tenía capacidad de regulación.

Alternativamente, dos geoquímicos, A.G. Cairns-Smith y Leila Coyne, han sugerido que los sólidos del medio ambiente tuvieron un papel crucial en el origen de la vida.

Sus ideas me han ayudado a definir la importancia de las soluciones supersaturadas, aunque los detalles sean objeto de controversia. El problema de las estructuras disipativas fluidas es que se disipan demasiado pronto. Si tienen que evolucionar hacia estructuras más permanentes se necesita algo sólido a modo de anclaje o algún lugar donde acogerse. De nuevo, la imagen mental de un instrumento de viento como una flauta es útil en este tema confuso. Soplar en él produce un siseo de turbulencias disipativas incoherentes.

Sin embargo, cuando el flautista sopla a través del agujero principal, las turbulencias quedan atrapadas y domesticadas dentro de los límites sólidos de los tubos huecos resonantes y emergen como notas musicales coherentes.

Los organismos vivos, en su evolución, también parece que hayan utilizado la seguridad del estado sólido de la materia para almacenar y pasar a sus descendientes el mensaje de la existencia. El estado sólido especial de los cristales aperiódicos de DNA almacena los programas de la célula y proporciona a los organismos una duración mucho más larga que la correspondiente a una turbulencia o a una reacción cíclica.

Las primeras células vivientes pueden haber utilizado como alimento los abundantes productos químicos orgánicos que se encontraban a su alrededor, junto con los cuerpos muertos de los competidores menos afortunados y los cuerpos de los afortunados que murieron por causas naturales. Posiblemente los aportes de materia prima y energía se hicieron rápidamente escasos y en alguna época temprana los organismos descubrieron cómo explotar la abundante e inagotable energía de la luz solar para fabricar su propio alimento.

Se cree que los primeros fotosintetizadores utilizaron la disociación fotoquímica del sulfuro de hidrógeno, que demanda menos energía.

Sin embargo, pronto se desarrolló la mejor solución, consistente en el uso de la energía luminosa para romper los fuertes enlaces que combinan el oxígeno con el hidrógeno y el carbono. Lo consiguieron las bacterias ahora llamadas cianobacterias debido a su color azul-verdoso, y ellas son los predecesores de todas las plantas verdes que existen en la actualidad.

En el Arcaico existía un sistema planetario completo. En la superficie -a la luz del Sol- estaban los productores primarios, las cianobacterias (ancestros de las mostradas en la figura 4.1) que utilizaban la luz del Sol para fabricar compuestos orgánicos y replicarse a sí mismas. También producían oxígeno, pero la abundancia de productos químicos inorgánicos reactivos en el medio ambiente mantuvo este gas próximo a su lugar de producción.

También estaban presentes en los ecosistemas primitivos los metanógenos, que obtenían materia y un poco de energía a partir del reordenamiento de los compuestos moleculares de los productores. La presencia de estos organismos «carroñeros» probablemente aseguraba la recolección continua de los residuos y cadáveres de fotosintetizadores y el retorno a las zonas de fotosíntesis del carbono esencial en forma de metano y dióxido de carbono.

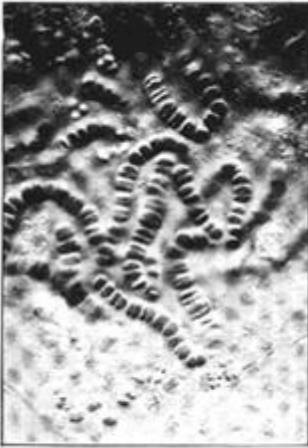
Los metanógenos no podían, como hacen los animales, comer las cianobacterias y utilizar el alimento que éstas habían sintetizado; para hacerlo hubieran necesitado del oxígeno.

Sospecho que la génesis de Gaia ocurrió separadamente al origen de la vida.

Gaia no se despertó realmente hasta que las bacterias ya habían colonizado la mayor parte del planeta. Una vez despierta, la vida planetaria resistiría asidua e incesantemente a los cambios que pudieran ser adversos y actuaría para mantener el planeta adecuado para la vida.

Formas de vida dispersas y agrupadas en oasis nunca hubieran tenido el poder de regular u oponerse a los cambios desfavorables que son inevitables en un planeta yermo. Probablemente sólo encontraríamos vida dispersa en los períodos de nacimiento o muerte de un sistema gaiano.

La exitosa evolución de los fotosintetizadores habría conllevado la primera crisis ambiental en la Tierra y, me gusta suponer, la primera evidencia del despertar de Gaia. Para obtener su energía los fotosintetizadores habrían utilizado como fuente de carbono el dióxido de carbono del aire y los océanos. Del mismo modo que ahora tenemos un problema con el dióxido de carbono, también lo debieron tener ellos.



41. Microfotografías de cianobacterias. Estos son los primeros organismos que utilizaron la energía de la luz solar para producir materiales orgánicos y oxígeno. Estos organismos han sido, tanto en estado libre como en forma de endosimbiontes, productores primarios desde el arcaico temprano hasta ahora (fotografías por cortesía de Michael Euzen).

Estamos empezando a darnos cuenta de que los beneficios de quemar combustibles fósiles para obtener energía se ven contrarrestados por los peligros inherentes a la acumulación del dióxido de carbono, que podría dar lugar a un sobrecalentamiento. El peligro al que se enfrentaron los fotosintetizadores era el inverso. Las cianobacterias utilizan el dióxido de carbono como alimento.

Devoraban la capa que mantenía la Tierra caliente. Durante un tiempo los volcanes pudieron proporcionar una vigorosa cantidad de dióxido de carbono, pero la capacidad potencial del sumidero bacteriano habría sobrepasado ampliamente el aporte de este origen. Si sólo hubiera habido fotosintetizadores su florecimiento abundante en los océanos y en la superficie hubiera reducido el

dióxido de carbono a niveles peligrosamente bajos en unos pocos millones de años.

Mucho antes de que las cianobacterias agotasen el dióxido de carbono para comer, la Tierra se habría enfriado hasta un estado de congelación y la vida sólo habría perdurado en los sitios en que el calor proveniente del subsuelo hubiera podido fundir el hielo, o bien el medio ambiente terrestre se hubiera desplazado a un ciclo de congelación y deshielo en la medida que el dióxido de carbono de los volcanes se acumulase y fuese eliminado de nuevo. Creo que ninguna de estas calamidades sucedió nunca.

La presencia persistente de rocas sedimentarias desde hace 3,8 eones hasta ahora sugiere que el agua líquida siempre ha estado presente y que la Tierra nunca se ha congelado totalmente. Lo que me gustaría proponer es una interacción dinámica entre los primeros fotosintetizadores, los organismos que procesaban sus productos, y el medio ambiente planetario. A partir de ésta se puede desarrollar un sistema estable auto-regulado, un sistema que mantiene la temperatura de la Tierra constante y adecuada para la vida.

Antes de aventurarse más en esta reconstrucción imaginaria de la vida con Gaia en el Arcaico, debo insistir en que no será más que un relato imaginario. La evidencia sólida del Arcaico es muy escasa, y se pueden construir diversos modelos sobre ella.

El eminente geólogo Robert Garrels me recuerda a menudo que en su modelo de la Tierra primitiva el dióxido de carbono era abundante (alrededor de un 20 por ciento en volumen) y que la Tierra era caliente (40 °C o más).

La idea de mi modelo no es discutir uno u otro de los ecosistemas arcaicos globales sino de ilustrar cómo la teoría de Gaia proporciona un conjunto diferente de reglas para los modelos planetarios. Las climatologías y geologías posibles de un planeta vivo son totalmente diferentes de las de un planeta muerto que transporta la vida como un simple pasajero. Dicho esto continuemos con el «spongamos».

Los fotosintetizadores utilizaban dióxido de carbono y lo convertían en materia orgánica y oxígeno o su equivalente arcaico, tal como lo hacen las plantas hoy en día.

El oxígeno habría sido absorbido inmediatamente por la materia oxidable del medio ambiente, el hierro y el azufre en los océanos. No había una población significativa de consumidores oxidativos pasciendo sobre los fotosintetizadores y devolviendo carbono al medio ambiente en forma de dióxido de carbono. No había oxígeno para que los consumidores respirasen; sólo se encontraba el producido y eliminado en yuxtaposición con los fotosintetizadores.

En lugar de los consumidores oxidativos existían los metanógenos, carroñeros y descendientes de los descomponedores originales de los productos químicos. Estas bacterias primarias, sólo capaces de existir en ausencia de oxígeno, obtenían la energía para vivir a partir de la descomposición de la materia orgánica, convirtiendo el carbono en dióxido de carbono y metano que devolvían al aire.

En el Arcaico éstas sirvieron, como los consumidores de hoy, para devolver al aire casi todo el carbono que había sido eliminado por los fotosintetizadores.

Sin embargo, ¿qué ocurría con el metano?

El metano es un gas que produce efecto invernadero como el dióxido de carbono aunque es menos estable en la atmósfera. Se descompone bajo la luz solar ultravioleta y reacciona con radicales hidroxilo, pequeñas moléculas formadas por un átomo de hidrógeno y otro de oxígeno, que son sorprendentemente reactivas y que eliminan del aire casi todas las otras moléculas a excepción de las más estables.

En el Arcaico es razonable suponer que esta zona de reacción fotoquímica se encontraba en la alta atmósfera, pero en un nivel en que el aire todavía era suficientemente denso como para absorber radiación ultravioleta. Cuando la radiación ultravioleta rompe el metano, los productos se combinan y recombinan con otras moléculas para formar una serie de compuestos químicos orgánicos complejos. Suspendidos en la alta atmósfera estos productos podrían incluir pequeñas gotas y partículas, un smog en la alta atmósfera.

Esta capa podría haber modificado profundamente el medio ambiente arcaico. Las radiaciones ultravioleta y visible del Sol habrían sido absorbidas en su presencia, y la región en que se produjera la absorción se habría hecho más caliente. La presencia de esta capa caliente en la atmósfera habría actuado como capa de «inversión» en la baja atmósfera, y habría invertido la tendencia normal de un descenso de temperatura a medida que se asciende desde la superficie.

En otras palabras, el smog de metano hubiera sido el equivalente arcaico de la capa de ozono, y habría actuado, tal como lo hace el ozono, tanto para estabilizar la estratosfera como para filtrar la radiación ultravioleta.

La existencia de una cubierta, la “tropopausa”, por encima de la atmósfera inferior habría reducido el flujo de metano hacia las regiones en que era destruido por los rayos ultravioleta. Ello constituye un proceso semejante a la manera en que el aire contaminado queda atrapado bajo la capa de inversión en los smogs por contaminación atmosférica del presente siglo.

De esta manera, la concentración de metano podría haber aumentado lo suficiente como para intervenir en el efecto invernadero.

Los productos de descomposición del metano en la estratosfera, vapor de agua incluido, habrían tenido una función parecida. La eliminación de radiaciones ultravioleta por la capa de smog habría preservado otros gases inestables como el amoníaco y el sulfuro de hidrógeno y hasta cierto punto habría permitido su acumulación en la atmósfera inferior.

La radiación solar intermedia descompone habitualmente el sulfuro de hidrógeno y otros gases similares, tanto de manera directa como mediante las reacciones fotoquímicas que generan los radicales hidroxilo. Puede suponerse que la atmósfera inferior, protegida por el smog de metano, contendría algo de oxígeno libre junto a un exceso de metano, de manera semejante a la existencia de metano libre en pequeñas cantidades junto al exceso de oxígeno en el aire que respiramos en la actualidad.

Ello todavía sería más probable si los fotosintetizadores existiesen en la superficie agrupados en comunidades autosuficientes. Entonces una parte del oxígeno que producirían se difundiría en el aire y persistiría durante un tiempo mucho más largo que en el caso de su emisión dentro de las aguas hambrientas de oxígeno de los océanos. En un modelo completamente detallado, deberíamos incluir gases tales como el óxido nitroso, sulfuro de carbonilo y cloruro de metilo, todos ellos componentes de nuestra atmósfera actual. Sin embargo, en relación con este modelo es suficiente considerar esta posibilidad junto con la sorprendente e intrincada serie de reacciones, así como las consecuencias que podrían derivarse de su existencia.

¿Hasta qué punto sería estable un ecosistema planetario formado a partir de fotosintetizadores que utilizasen dióxido de carbono y organismos heterótrofos que reconvirtiesen la materia orgánica en dióxido de carbono y metano? Los fotosintetizadores son en muchos aspectos como las margaritas blancas; su crecimiento enfría la Tierra eliminando dióxido de carbono.

Los descomponedores metanógenos son como las margaritas negras; su crecimiento calienta la atmósfera mediante la adición de gases de efecto invernadero en el aire. No es difícil hacer un modelo del mundo simplificado que acabo de describir, construido a la manera del modelo de las margaritas de los capítulos 2 y 3. Este se ilustra en la figura 4.2 donde se muestra la evolución temporal de la temperatura media de la Tierra, de los gases atmosféricos, y de la población del ecosistema bacteriano.

El modelo utilizaba la estimación de H.D. Holland del aporte de dióxido de carbono de los volcanes, aunque se consideró que el sumidero de dióxido de carbono debido a la meteorización de las rocas aumentaba según se desarrollaba el ecosistema.

Basé la regulación climática fundamental en la capacidad del dióxido de carbono y el metano de actuar como gases de efecto invernadero. Se consideró además un pequeño efecto adicional -la colonización de superficies terrestres tendería a incrementar la nubosi-

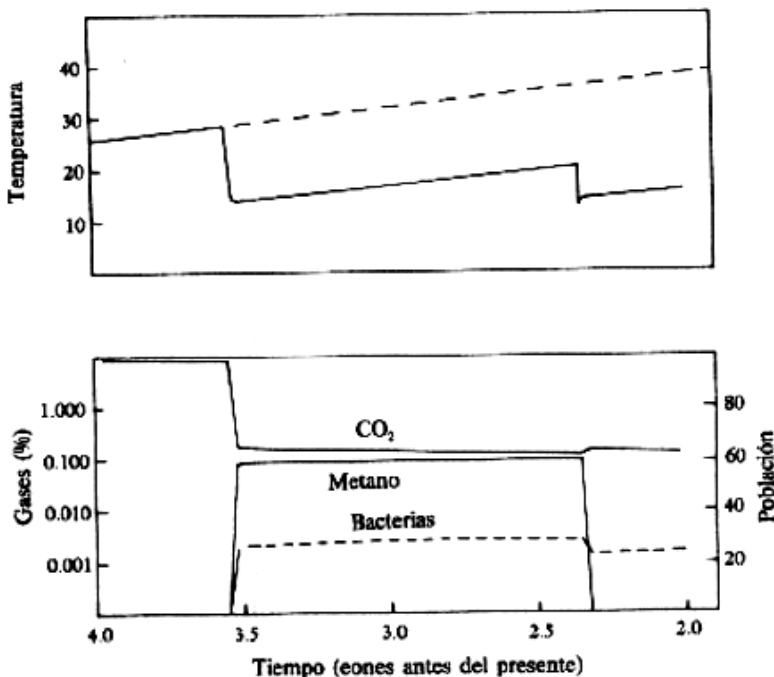
dad y, por tanto, tendería a incrementar la reflexión de la luz del Sol hacia el espacio exterior.

La parte superior de la figura 4.2 muestra la evolución de la temperatura en este mundo anóxico con y sin la presencia de vida. La línea a trazos corresponde al incremento esperado de temperatura en un planeta sin vida que contiene suficiente dióxido de carbono para originar una presión atmosférica de 100 milibares, cerca de una décima parte de la presión atmosférica actual.

Se consideró que la mayor parte de la atmósfera estaba formada por nitrógeno, como sucede ahora en la Tierra. Se consideró que la estrella era de un 25 a un 30 por ciento menos luminosa de lo que es ahora, pero que se calentaba a lo largo del tiempo al igual que el Sol. La línea continua representa la temperatura del modelo del mundo en el que los fotosintetizadores coexisten con los metanógenos.

Obsérvese la caída abrupta y repentina de temperatura de unos 28 °C a 15 °C tras el origen de la vida. Ello es consecuencia de la rápida disminución de dióxido de carbono debido a que los fotosintetizadores lo utilizan para crear sus cuerpos. La caída no continúa hasta la congelación del planeta porque un nuevo gas de efecto invernadero, el metano, y una parte del dióxido de carbono, son devueltos al aire por los metanógenos.

Una vez que se establece el estado estacionario, este mecanismo cibernético simple regula la temperatura planetaria a lo largo del Arcaico.



4.2. Modelo del Arcaico antes y después de la vida. El cuadro superior muestra el clima con y sin vida y el cuadro inferior la abundancia de los gases atmosféricos y poblaciones de bacterias a lo largo de la evolución del sistema. La escala para la abundancia de los gases atmosféricos es logarítmica; la escala para la población es en unidades arbitrarias.

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

El modelo encaja con la historia antigua de la Tierra. No hay evidencia de cambios inusuales de temperatura durante el Arcaico, y hubo un período glacial frío hace 2,3 eones que pudo haber coincido con la aparición del oxígeno atmosférico. La parte inferior de la figura 4.2 muestra cómo la población total de bacterias y la

abundancia de dióxido de carbono y metano cambian con el tiempo. Se ve que el origen de la vida coincide con la caída del dióxido de carbono y el ascenso del metano. El final del Arcaico está señalado por la desaparición del metano.

Este modelo sencillo, como el modelo del mundo de las margaritas, es resistente y no se distorsiona fácilmente por cambios en la radiación solar, poblaciones de bacterias o aportes de dióxido de carbono de fuentes volcánicas.

Es sensible a cambios en el rango o tipo de relación entre el crecimiento de las bacterias y la temperatura ambiente. El modelo está basado en la suposición de que el crecimiento del ecosistema bacteriano cesaba en el punto de congelación, era máximo a 25 °C, y cesaba de nuevo a temperaturas por encima de 50 °C.

Como en el mundo de las margaritas, hay un abrupto cambio de temperatura cuando empieza la vida. Los organismos vivos crecen rápidamente hasta que se llega a un estado estacionario en que crecimiento y muerte se compensan. Esta tendencia rápida, casi explosiva, a expandirse para ocupar un nicho ambiental actúa como un amplificador. El sistema evoluciona rápidamente en realimentación positiva hasta aproximarse a un equilibrio. Pronto se alcanza la estabilidad y el planeta se mantiene en una homeostasis adecuada.

De acuerdo con el modelo, existe un gran contraste en la composición de la atmósfera arcaica antes y después de la vida. La tabla 4.1 muestra las proporciones de los principales gases en estas dos etapas. Se observa un incremento del nitrógeno tras el origen de la vida. Me preguntaba si hasta entonces una parte del nitrógeno habría estado presente como ión amonio (NH_4^+) en los océanos.

El mar era más ácido debido al exceso de dióxido de carbono y era rico en ión ferroso. En estas circunstancias, el ión ferroso podría haber secuestrado una proporción importante de amonio para formar un complejo ferro-amónico estable, en cuya forma se encontraría una parte importante del nitrógeno. Tanto la caída del dióxido de carbono como la utilización del nitrógeno por la vida habrían modificado el balance en favor del nitrógeno gaseoso.

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

La razón de ello es un poco recóndita y está relacionada con un incremento en la absorción de radiación infrarroja por los gases del efecto invernadero cuando la presión atmosférica es más alta.

Tabla 4.1. ESTIMACION DE LA COMPOSICION DE LA ATMOSFERA ARCAICA ANTES Y DESPUES DE QUE APARECIESE LA VIDA

<i>Gas</i>	<i>Antes de la vida</i>	<i>Después de la vida</i>
Dióxido de carbono	dominante	0,6 %
Nitrógeno	desconocido	99 %
Oxígeno	0	1 ppm
Metano	0	100 ppm
Hidrógeno	algo	1 ppm

Es importante observar que hay otros modelos del Arcaico igualmente plausibles. Los conocimientos convencionales se expresan en el libro de Holland: considera que el medio ambiente anterior a la vida transcurría sin cambios. Robert Garrels prefiere caracterizar este período por altas temperaturas sostenidas por altas concentraciones de dióxido de carbono en el aire.

Probablemente pasará mucho tiempo antes de que estemos seguros de la historia antigua de la Tierra. Sin embargo, el propósito de este capítulo no es hacer una descripción firme de las condiciones reinantes durante el Arcaico, sino mostrar cómo la teoría de Gaia se puede usar para construir un cuadro diferente de aquellos tiempos.

Me gusta imaginar que un químico extraterrestre hubiera llegado al sistema solar hace mucho tiempo y hubiera visto la atmósfera de la Tierra antes de la vida. El espectrofotómetro infrarrojo de su nave espacial hubiera reconocido un planeta en el estado estacionario

abiológico -un planeta que todavía no está vivo pero con el potencial para contener vida-.

En una segunda visita muy posterior, cuando la vida ya se hubiera desarrollado, un análisis semejante hubiera mostrado un grado de desequilibrio imposible de mantener en un planeta sin vida. El dióxido de carbono, el metano, el sulfuro de hidrógeno y el oxígeno no pueden coexistir en las proporciones mostradas en la tabla 4.1 en presencia de la luz solar. Debido a los efectos destructivos de la radiación ultravioleta en el metano, oxígeno y sulfuro de hidrógeno, el extraterrestre se hubiera dado cuenta de que existía una fuente que regeneraba constantemente estos gases. Ninguna fuente volcánica concebible podría mantener una atmósfera semejante.

El extraterrestre hubiera llegado a la conclusión de que la Tierra estaba ahora viva.

A menudo me pregunto cuánto se parecía la Tierra arcaica a la nuestra. Sospecho que desde una nave espacial orbital no parecería la esfera familiar azul y blanca con la tierra y el mar asomando bajo la capa nubosa. Más probablemente, la Tierra habría sido un planeta nublado marrón-rojizo, como Venus o Titán, demasiado opaco para poder ver la superficie subyacente. El cielo que ahora vemos tan azul y claro es consecuencia de la abundancia de oxígeno. El oxígeno es la lejía permanente que limpia y refresca el aire.

En una playa al borde de un continente arcaico contemplaríamos olas rompiendo en la fina arena y detrás una pendiente de dunas. Sería familiar excepto por los colores. El Sol en lo alto tendría un color rojizo como el que ahora tiene al atardecer. El cielo tendría un color rosáceo y el mar, el gran imitador, sombras marrones. No habría conchas ni rastros de cosas moviéndose por la arena. En la marea baja las olas grandes romperían a lo lejos dejando expuestos extraños arrecifes provocados por estromatolitos en forma de seta, creados por el carbonato cálcico segregado por las colonias vivas de cianobacterias.

Tierra adentro, detrás de la arena y la zona de dunas, habría aguas estancadas con manchas verdes y negras correspondientes a espesas proliferaciones bacterianas. Aparte del viento y de las olas, el

único sonido audible sería el «plaf» de las burbujas de metano explotando al romper su encierro en el barro. Más allá de la laguna y la superficie continental se hubiera repetido el mismo paisaje en cualquier sitio en que se hubieran podido encontrar depresiones someras con agua.

En la tierra más seca de las laderas de las colinas, un barniz de vida microbiana hubiera trabajado incesantemente en la meteorización de las rocas, aportando nutrientes y minerales a las corrientes de agua de lluvia y eliminando continuamente dióxido de carbono del aire. Este paisaje tranquilo habría durado a lo largo de la mayor parte del Arcaico.

Sin embargo, habría habido interrupciones violentas durante la caída de asteroides desde el espacio. Por lo menos hubo diez catástrofes de este tipo, cada una suficiente como para destruir más de la mitad de toda la vida planetaria. Estas habrían alterado el medio ambiente físico y químico lo bastante como para poner en peligro la existencia de la vida durante cientos, o quizá miles, de años después de cada episodio.

Debemos rendir homenaje a la fuerza de Gaia por el hecho de que nuestra casa planetaria se recuperase de manera tan rápida y eficiente después de estos sucesos.

El paisaje sin vida hubiera sido muy diferente. Las fuerzas ineludibles que gobiernan la evolución química y física conducen a los pequeños planetas interiores a un estado oxidado a causa de la pérdida de hidrógeno. Venus puede haber contenido algo de agua al principio. Estimaciones a partir de las proporciones de los gases nobles no reactivos indican que cuando los planetas se formaron Venus podría haber tenido al menos un tercio del agua que hay en la Tierra.

¿Adónde fue?

Lo más probable es que el hierro y el azufre de las rocas superficiales secuestraran el oxígeno presente en las moléculas de agua. Estas reacciones habrían liberado hidrógeno gaseoso, que había escapado al espacio. La radiación ultravioleta en los límites de la atmósfera podría también haber escindido una parte del vapor de

agua en hidrógeno y oxígeno. En cualquier caso, el hidrógeno, y en consecuencia el agua, se perdieron para siempre y el planeta evolucionó a un estado más oxidado. Ahora Venus, con su calor de horno y su aire cargado de azufre, es un modelo del infierno. En comparación, gracias a la vida que soporta, la Tierra es el cielo.

¿Cómo persistieron nuestros océanos?

Parece probable que la presencia de vida haya tenido algún papel. Robert Garrels me dijo que sus cálculos sugieren que en ausencia de vida la Tierra se hubiera desecado en aproximadamente 1,5 eones, la mitad del Arcaico. Hay varias maneras de retener el hidrógeno en un planeta. Una es introducir oxígeno en la atmósfera o el medio ambiente para que capture hidrógeno formando agua.

La vida, en la fotosíntesis, divide el dióxido de carbono en carbono y oxígeno. Si una parte del carbono queda sepultado en las rocas de la corteza resulta un incremento neto de oxígeno. Por cada átomo de carbono enterrado se obtienen dos átomos de oxígeno. Por tanto, cuatro átomos de hidrógeno o dos moléculas de agua.

También hay que considerar las reacciones que ocurren en el fondo del océano entre el agua y el ión ferroso de las rocas basálticas. El hidrógeno libre producido constituiría un alimento para aquellas especies bacterianas que pudiesen obtener energía transformándolo en metano, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos menos volátiles que el hidrógeno.

El metano descompuesto en la estratosfera por la radiación ultravioleta podría estratificar la atmósfera y retardar así la difusión de los gases procedentes de la atmósfera inferior, lo que también retardaría la fuga de hidrógeno al espacio. De ésta y otras maneras más sutiles la presencia de la vida arcaica habría salvado a nuestro planeta de una muerte polvorienta.

Elso Barghoorn y Stanley Tyler descubrieron por primera vez las bacterias fósiles que llevaron al reconocimiento de las primeras formas de vida en tiempos arcaicos. Una vez visité los laboratorios de Barghoorn en la Universidad de Harvard y comprobé por mí mismo las refinadas técnicas instrumentales que empleaba para cortar, con sierras de diamante, duras rocas en láminas finas y

transparentes. De esta manera, él y Tyler encontraron microfósiles de bacterias en el antiguo peñasco del Glunflint, en la región de los Grandes Lagos de América del Norte.

Sin embargo, estos antiguos fósiles pertenecen a lugares húmedos; todavía no sabemos si había vida en la tierra seca. Encuentro difícil de creer que una forma de vida tan emprendedora como las bacterias hubiera desaprovechado las superficies terrestres. En este momento quiero dejar claro lo que considero que es una hipótesis falsa acerca -de aquellos tiempos primitivos. Ahora estamos aplicando una nueva teoría para describir el paisaje que permite explicar coherentemente las pocas evidencias genuinas de que disponemos.

La imagen falsa, que se desvanece como un espejismo, es la creencia del “frágil escudo de la Tierra”. De alguna manera, los meteorólogos L.V. Berkner y L.C. Marshall fueron quienes la encendieron hace treinta años, cuando introdujeron su famosa teoría de la evolución del oxígeno atmosférico. Un aspecto crucial de la misma era la consideración de que existía un flujo de radiaciones ultravioletas letales antes de que existiera oxígeno en el aire y que esto impidió que la vida pudiera colonizar las superficies terrestres.

Se sostenía, además, que la vida anterior al oxígeno tenía que estar obligada a existir en las profundidades del mar, donde no podía penetrar la radiación ultravioleta. Fue sólo después que apareciese el oxígeno en el aire que pudo formarse ozono y éste pudo actuar como un escudo protector contra los rayos ultravioleta impidiendo que alcanzasen la superficie. Después de esto, el camino quedaba abierto para que una vida abundante pudiera colonizar la tierra firme y posibilitar el aumento de la concentración de oxígeno hasta su nivel actual del 21 por ciento mediante un incremento de la fotosíntesis.

Ahora sospechamos que algunos detalles de esta teoría, tales como que el oxígeno fue en ocasiones más abundante que ahora, estaban equivocados. Esto no debe entenderse como un demérito, pues los autores no disponían entonces de la información necesaria para contrastar sus teorías. Tenemos una inmensa deuda con Berkner y

Marshall por el efecto estimulante que sus ideas tuvieron en el desarrollo de las ciencias de la Tierra.

Antes que ellos hubo otros científicos como Vernadsky y Hutchinson que presentaron un modelo del mundo en el que la vida también tenía un papel activo y no sólo era un espectador obligado a adaptarse a los caprichos químicos y climáticos de un mundo puramente físico y químico. La comunidad científica recibió sus ideas con entusiasmo. Entre estas ideas se encontraba el postulado menor de que la presencia de una capa de ozono estratosférica es un requerimiento esencial para la vida en la superficie. Casi todos los científicos aceptan hoy esta idea como si fuese un hecho probado por la ciencia.

Podría no haber existido capa de ozono en los orígenes de la vida y durante el Arcaico. Los gases dominantes en la química de la atmósfera eran el hidrógeno y el metano. Incluso si hubiera habido algo de oxígeno en la atmósfera no habría podido producirse ozono. (El ozono se produce cuando la radiación ultravioleta en la estratosfera escinde las moléculas de oxígeno en dos átomos separados, que entonces se combinan con otras moléculas de oxígeno para formar una especie de oxígeno de tres átomos: O₃.)

La intensidad de la radiación ultravioleta sobre la superficie de la Tierra en ausencia de ozono sería 30 veces mayor que la actual. Se dice que semejante irradiación habría esterilizado la superficie terrestre. Los creyentes más comprometidos en la energía de la radiación ultravioleta mantienen que se necesitan de 10 a 30 metros de agua oceánica para filtrar la radiación mortal. Sostienen que la vida no hubiera podido existir en las aguas someras ni en la superficie.

Lo más probable es que «el escudo frágil de la Tierra» sea un mito. Efectivamente, la capa de ozono existe hoy en día, pero es una fantasía creer que su presencia sea esencial para la vida. Mi primer trabajo como graduado fue en el National Institute of Medical Research en Londres. Mi jefe era el amable, y distinguido generalista, Robert Bourdillon. Tuve el privilegio de observar, y luego participar, en experimentos que él y mi colega, Owen Lidwell, realizaron

cuando intentaban matar bacterias por exposición a radiación solar no filtrada.

Nuestro objetivo práctico era la prevención de infecciones recurrentes en salas de hospital y quirófanos. Buscábamos una manera de matar las bacterias del aire y prevenir de este modo la extensión de la infección. Algunas especies de bacterias lavadas y desnudas eran destruidas fácilmente por radiación ultravioleta cuando eran suspendidas en el aire, incluidas en gotas finas. Sin embargo, era impresionante observar cómo una pequeña película de materia orgánica podía proteger de forma casi completa hasta las especies más sensibles.

En el mundo real fuera del laboratorio las bacterias no se encuentran suspendidas en agua destilada o soluciones salinas. En sus hábitats normales las bacterias están revestidas de protecciones mucosas fabricadas con componentes orgánicos y minerales tomados de su medio ambiente. Ya no están desnudas como en nuestros experimentos. Se hicieron muchos ensayos hasta que se concluyó que la radiación ultravioleta no era un método efectivo para la eliminación de los delicados y frágiles patógenos del ambiente hospitalario.

Apenas se necesitan prendas para parar la radiación ultravioleta. (*)

El recuerdo de estos experimentos me inclinó a no aceptar que la radiación en las superficies terrestres arcaicas por luz ultravioleta natural, mucho más débil, hubiera podido evitar su colonización. Los organismos que entonces se encontraban allí estaban acostumbrados a vivir al aire libre y disponían de millones de años para adaptarse ellos mismos o acondicionar la Tierra. También es erróneo considerar que entre todos los gases atmosféricos sólo el ozono puede filtrar la luz ultravioleta.

Muchos otros compuestos absorben y eliminan radiación ultravioleta. Los candidatos más probables en el Arcaico serían los produc-

* Aquellos que permanezcan escépticos quizá se convenzan mediante los informes estos experimentos en el Medical Resarch Council's Special Report número 262, titulado *Studies in Air Hygiene*, publicado en 1948. (N. del A.)

tos análogos al smog generados por la descomposición del metano o del sulfuro de hidrógeno.

En el océano hay incluso más posibilidades. Los abundantes iones de elementos de transición tales como hierro, manganeso y cobalto tienen una intensa capacidad de absorción de luz ultravioleta, así como las sales del ácido nitroso y diversos ácidos orgánicos. Pero aún en el caso de que luz solar ultravioleta sin filtrar de ningún modo hubiera brillado en la superficie, la vida no se hubiera resentido demasiado. Los organismos son esencialmente oportunistas.

Probablemente habrían transformado la energía ultravioleta dura para su uso en forma de fuente de energía de alto rendimiento. Es un insulto a la versatilidad de los sistemas biológicos suponer que una débil penetración de radiación como la luz solar ultravioleta podía constituir un obstáculo insuperable para la vida en la superficie. Incluso los seres humanos de piel negra son casi inmunes a sus efectos, y esta radiación es empleada en la piel de todos nosotros para la producción fotobioquímica ocasional de vitamina D.

La aceptación del criterio de que la radiación ultravioleta es incondicionalmente mortal para la vida ha mantenido una concepción equivocada del Arcaico y de otros períodos en la evolución de Gaia. Sin embargo, este es un criterio profundamente arraigado en el pensamiento científico. Me daba cuenta de que era común entre los científicos que buscaban vida en Marte.

No podía ayudarles planteando cómo era posible que pensasen que había vida en la superficie intensamente irradiada de Marte y al mismo tiempo creyeran que la Tierra, detrás de la espesa y turbia atmósfera arcaica, era estéril. ¿Cómo podían encajar en sus mentes dos ideas tan contradictorias?

Creo que una amenaza más seria para la salud de las comunidades terrestres de aquellos tiempos sería la necesidad de lluvia. La lluvia en las masas continentales del presente es en gran medida una consecuencia de la evapotranspiración: el bombeo de los árboles y plantas de grandes cantidades de agua desde el suelo a sus hojas, donde se evapora.

Las plumas ascendentes de vapor de agua sobre los bosques actúan como montañas invisibles y fuerzan al aire que entra desde el océano a derramar su carga de agua. Incluso en el caso de que la vida bacteriana creciese hasta formar estromatolitos es improbable que estas estructuras coloniales que destacaban por encima de la superficie fuesen tan eficientes en la producción de lluvia como los árboles.

Sin embargo, a pesar de su tamaño, las bacterias tienen sus tácticas para producir lluvia. Recientemente se ha encontrado que bacterias del género *pseudomonas* sintetizan una macromolécula que puede inducir la congelación de gotas de agua superenfriadas por debajo de 0 °C.

Aunque un volumen de agua se congela cuando la temperatura cae por debajo de 0 °C, como ocurre en una piscina o en un cubito de hielo, las gotas de agua que se han condensado dentro de una nube pueden no congelarse hasta que la temperatura desciende por debajo de -40 °C. Este superenfriamiento tiene lugar en ausencia de núcleos de partículas sólidas sobre las que puedan formarse y crecer cristales microscópicos de hielo.

El agua pura es reacia a congelarse. Lo hace en nuestras neveras porque en las masas de agua siempre hay alguna partícula que permite iniciar el proceso de agregación. Algunos compuestos químicos, como el ioduro de plata, tienen formas cristalinas similares al hielo. Si se esparcen estos cristales en una nube superenfriada desencadenarán el proceso de congelación y eventualmente la caída de agua.

La macromolécula que sintetizan los pseudomonadinos da lugar a que se congelen las gotas enfriadas a sólo -2 °C. Son, por tanto, mucho más eficientes que el ioduro de plata. Estas propiedades han sido estudiadas desde un punto de vista comercial para desarrollar métodos de generación de lluvia. Los cristales de ioduro de plata sólo sirven tras un cierto tratamiento y la producción de la eficiente macromolécula de los pseudomonadinos está en curso.

Sin embargo, algunos ecologistas piensan que el robo de lluvia es socialmente indeseable, pues ésta podría haber caído sobre los que quizá la necesitan más.

Los pseudomonadinos tienen una historia antigua y quizá su truco para la nucleación del hielo se remonta al Arcaico. En tal caso ¿son ellos los generadores de lluvia que lideraron la conquista de la tierra firme? Una pregunta que surge siempre en este punto de la especulación es ¿cómo ocurrió? Probablemente las bacterias no decidieron fabricar una sustancia nucleadora de hielo.

En este momento los microbiólogos serios se ponen nerviosos y temen la proximidad de otra herejía teleológica. Afortunadamente, podemos construir fácilmente un modelo plausible de la evolución, en donde se acopla un efecto ambiental de gran escala y la actividad local de los microorganismos -además un modelo libre de toda mancha de previsión.

Es probable que los sistemas fisiológicos regionales y globales de Gaia tengan sus orígenes en la competencia e interacciones locales entre especies. Una forma primitiva del generador de hielo puede haber encontrado alguna ventaja en la congelación del rocío en sus lugares de crecimiento. Mediante ésta, puede haber destruido a un competidor o a un predador, roto la piel dura de un organismo que le servía de alimento, o producido rupturas mecánicas en rocas para liberar nutrientes o incrementar la cantidad de partículas del suelo. Cualquiera de estos efectos, solo o en combinación, daría ventaja al generador de hielo y, lo que es más importante, daría ventaja al mayor o mejor nucleador.

Como consecuencia de ello se obtendría una distribución ubicua del mejor nucleador posible. Por razones puramente locales, estas bacterias continuarían su actividad congeladora en cualquier sitio donde esto les reportase alguna ventaja. Por otra parte, no es difícil comprender que los ecosistemas superficiales que transportasen generadores de hielo estarían en ventaja con respecto a los incapaces de producir agentes nucleadores. El polvo del suelo agitado por el viento o levantado por torbellinos podría inducir la congelación de gotas en las nubes y luego la lluvia.

Un aspecto que se conoce con detalle es el de la interrelación entre la congelación de las gotas de las nubes y la caída subsiguiente de lluvia. Cuando se congela el agua se libera una gran cantidad de calor. En otras palabras, la congelación de la mitad del agua en una gota superenfriada a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ libera calor suficiente para aumentar la temperatura de la mezcla de agua y hielo $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el punto de congelación. Si se congela una gran proporción de gotas superenfriadas de una nube, el calor latente liberado calienta la nube y la hace ascender.

Ello da lugar a que más vapor de agua se condense y congele, de manera que el hielo y la nieve añadidos dan lugar a que la nube gane agua y peso, y se produzca la precipitación. Por tanto, cualquier producto de un organismo vivo que nucleee gotas superenfriadas de una nube favorecerá la lluvia.

Por otra parte, la condensación de vapor de agua supersaturado es todavía más importante para la regulación climática que la congelación de gotas de agua superenfriada. El aire que se encuentra por encima del océano a menudo está supersaturado de vapor de agua. Sin embargo no se pueden formar nubes ni gotas sin la presencia de partículas finas, los núcleos de condensación de las nubes.

El climatólogo Robert Charlson ha indicado que las emisiones de compuestos de azufre por el biota han tenido un papel importante en la provisión de núcleos de condensación de nubes tanto en la actualidad como en el pasado reciente. Sin embargo se requiere la presencia de oxígeno atmosférico para la oxidación del azufre a ácidos sulfúrico y metanosulfónico, los agentes nucleantes.

Ello no podría haber ocurrido en el Arcaico, pero otras especies moleculares pueden haber cumplido esta función. El aerosol de sal marina formado al romperse las olas tiene alguna capacidad de nucleación, pero es pequeña en comparación con las microgotas de ácido sulfúrico.

Aunque la lluvia es esencial para el crecimiento en la tierra, también conlleva problemas porque elimina nutrientes. (Un buen ejemplo de este problema lo constituyen las tierras altas de la costa

oeste de las islas Británicas cuya baja productividad se debe a que son lavadas constantemente por la lluvia.)

En la actualidad, los ríos transportan al océano elementos que son utilizados o requeridos por la vida marina -como por ejemplo nitrógeno, fósforo, calcio y silicio-. Sin embargo, los ríos también llevan al mar otros elementos más raros -azufre, selenio y iodo-, y la tierra se empobrece.

Ello nos conduce a otro mecanismo geofisiológico de gran escala: la transferencia de elementos esenciales o nutrientes desde el océano, donde son abundantes, a la tierra, donde son escasos. El proceso requiere que la vida marina sintetice compuestos químicos específicos que actúen como transportadores de elementos a través del aire. El azufre, por ejemplo, es transportado del océano a la tierra mediante el sulfuro de dimetilo, un producto de las algas marinas.

En el Arcaico, el medio ambiente estaba libre de oxígeno o bien los gases reductores predominaban sobre éste. En semejante atmósfera no es posible la síntesis de sulfuro de dimetilo, que sólo parece tener lugar en ambientes oxidantes. Sin embargo, la vida terrestre arcaica habría necesitado un menor aporte de azufre que el actual. Para esta finalidad habrían podido servir compuestos tales como el sulfuro de hidrógeno y disulfuro de carbono, que son inestables en nuestro aire actual oxidante.

El sulfuro de hidrógeno es ubicuo en Lonas anóxicas y reacciona con muchos metales -como el plomo, la plata y el mercurio- que en caso contrario podrían acumularse hasta niveles tóxicos. El resultado de este proceso son sulfuros insolubles en agua que se depositan como sólidos. El geoquímico Wolfgang Krumbein ha mostrado que los lechos minerales de estos elementos expuestos hoy día en o cerca de la superficie son los vertederos de desechos de algún ecosistema anóxico del pasado.

Los organismos anaerobios que convierten los elementos, potencialmente tóxicos, mercurio y plomo en sus metil derivados volátiles proliferaron con éxito y proporcionaron al ecosistema un mecanismo para eliminar residuos tóxicos. Las zonas anóxicas son atra-

vesadas continuamente por un flujo de gas metano que serviría para llevarse lejos estos materiales volátiles.

Una parte de esta actividad metilante es beneficiosa a escala regional o incluso global. La producción de selenuro de dimetilo, descubierta por primera vez por el químico atmosférico F.S. Rowland, es útil para compensar de una manera sutil la toxicidad del dimetil mercurio. También sirve para el reciclado del selenio, elemento esencial, a escala mundial (o planetaria).

La tasa de deposición del carbono durante el Arcaico no era significativamente diferente a la de hoy. Como vimos anteriormente, el carbono presente en la roca sedimentaria más antigua muestra una pequeña diferencia en la proporción de sus isótopos con respecto a la de las rocas lunares que nunca han sido expuestas a la vida. Esta diferencia proporciona evidencia de la presencia de fotosintetizadores. El geólogo Euan Nisbet me dice que hay depósitos arcaicos ricos en carbono en Sudáfrica.

Son como los yacimientos de carbón almacenados a partir de los bosques del período Carbonífero, eones después. Estos depósitos de carbono constituyen todo lo que queda de los cuerpos muertos de los microorganismos que una vez vivieron en el Arcaico. Tanto en este período como en la actualidad, los volcanes descargaron dióxido de carbono.

Las bacterias fotosintéticas utilizaron este dióxido de carbono para elaborar los compuestos orgánicos de sus células; dichos organismos también pueden haber facilitado la reacción del dióxido de carbono con el calcio y otros iones divalentes disueltos en el mar y en las superficies terrestres.

Estas dos reacciones constituían los sumideros de dióxido de carbono y lo mantenían a un nivel constante en la atmósfera. Tal como se ha indicado anteriormente, ello forma parte del sistema de regulación climática ilustrado en la figura 4.2. Además de este efecto de consecuencias climáticas, los sistemas arcaicos habrían depositado una proporción pequeña, pero constante, del carbono orgánico que habría dado lugar a un suministro estable de oxígeno.

Sin embargo, éste habría sido utilizado en la oxidación de los compuestos reducidos de los ambientes oceánicos y de la superficie, y de los emitidos por los volcanes. Algo parecido a uno de estos experimentos de los estudios de bachillerato, en que se añade de forma progresiva una solución oxidante a una solución reductora hasta que un indicador cambia de pronto de color para señalar el cambio repentino de reductor a oxidante al final de la valoración.

La deposición de una proporción pequeña de carbono y azufre, procesados por bacterias que existieron en algún momento, dio lugar a la valoración del material oxidable del medio ambiente hasta que se agotó el excedente. Se continuó añadiendo material reductor al océano y la atmósfera, pero la velocidad de adición era menor que la de deposición de carbono.

El oxígeno libre empezó a encontrarse en el aire a niveles más que suficientes para vencer la tendencia reductora del metano, y marcó el final de la época.

Parece probable que el final del período en que el metano dominaba la química de la atmósfera fuera abrupto. Sin embargo, sería erróneo considerar un salto repentino desde un mundo carente de oxígeno a uno en que el oxígeno se encontraba en forma libre en el aire. Es mucho más probable una proliferación gradual de organismos aeróbicos en la superficie de la Tierra durante el último período arcaico.

Estos podrían haberse encontrado principalmente en la superficie, donde los fototróficos expuestos al Sol habrían producido localmente suficiente oxígeno para mantenerlos. Consistirían en un ecosistema separado y encapsulado sobreviviendo en un sistema letal, de manera semejante a la supervivencia de los anaerobios en el mundo venenoso y rico en oxígeno de la actualidad.

En este ecosistema oxidante habría consumidores que vivirían de los productos orgánicos de las cianobacterias, y también organismos capaces de explotar un medio ligeramente oxidante y llevar a cabo habilidades como la desnitrificación (usando iones nitrato y nitrito en lugar de oxígeno de manera que el nitrógeno escaparía al aire como nitrógeno gaseoso y óxido nitroso).

De forma gradual, a medida que se agotaban los compuestos del mar capaces de eliminar oxígeno, no se absorbería el oxígeno liberado por los fototrofos. Entonces, la relación entre el flujo de metano y oxígeno se desplazaría hacia un exceso de oxígeno. Se extenderían los ecosistemas oxidantes que probablemente habrían cubierto la mayor parte de los océanos justo antes de que el oxígeno libre aumentase para convertirse en el oxidante dominante. El cambio fue más bien una dominación que un genocidio.

Extraños escenarios son incluso probables si las comunidades de la superficie hubiesen generado óxido nitroso antes de que el mismo oxígeno apareciese. Este gas es estable en la troposfera y pudiera haber permitido persistir al metano durante más tiempo. También es en cierta medida un gas de efecto invernadero y pudiera haber compensado la disminución de metano. Ahora es sintetizado por bacterias y es probable que entonces hubiera bacterias que lo fabricasen.

En geofisiología, el final del Arcaico coincidió con el gran acontecimiento marcado por la presencia del oxígeno libre en el aire. Sin embargo, para las bacterias arcaicas la era nunca acabó.

Ellas medran en cualquier ambiente que esté libre de oxígeno. Ellas son el motor de los vigorosos y extensos ecosistemas de las zonas anóxicas del fondo marino, de las zonas húmedas y marismas, y de los intestinos de casi todos los consumidores, incluyendo a nosotros mismos. En un sentido geológico estricto, el período finalizó hace 2,5 eones y el oxígeno puede haber venido después. La aparición del oxígeno en el aire y en la superficie de los océanos no eliminó los ecosistemas anóxicos, sólo los segregó a las aguas estancadas y los sedimentos.

Como consecuencia, las rocas que se formaron a partir de estos sedimentos pueden no haber registrado la presencia de oxígeno libre en el aire.

Este es, por tanto, un relato de unos pocos aspectos del Arcaico contemplados a través de la teoría de Gaia. Era un período en que el sistema funcional de la Tierra estaba totalmente dominado por bacterias. Fue un período largo, en que los constituyentes vivos de

Gaia se habrían podido considerar de forma acertada como pertenecientes a un único tejido.

Las bacterias son móviles y mótilas y se podrían haber desplazado por todo el mundo arrastradas por los vientos y las corrientes oceánicas. También pueden intercambiar fácilmente información en forma de mensajes codificados en las cadenas de ácidos nucleicos de bajo peso molecular llamadas plásmidos. Toda la vida en la Tierra estaba por tanto ligada por una red de comunicación lenta, pero precisa.

La visión de Marshall McLuhan de la «aldea global», con seres humanos ligados en una red parlante de telecomunicaciones, es una reedición de este mecanismo arcaico.

LAS EDADES MEDIAS

Los conocimientos acerca del importante período de transición entre los 2.000 millones de años y los 700 millones de años antes del presente son escasos. Si tienes interés sobre la Tierra y quieres conocer la historia de las rocas, hay pocos sitios mejores para haber nacido que Inglaterra o Gales. Mi pequeña isla, que limita con estos dos países, contiene tantos períodos geológicos como un continente.

A lo largo de su extensa costa las olas han recortado acantilados y estas paredes de roca muestran sus estratos diseccionados como en un diorama de museo. Acostumbraba a pasar mis vacaciones infantiles en un lugar llamado Chapman's Pool en la costa del condado de Dorset; allí los acantilados negros y sombríos de los esquistos de Kimmeridge se encuentran moteados por ammonites y otros fósiles, blancos como la nieve.

A medida que uno se mueve hacia el oeste a través de Inglaterra, las rocas retroceden en la historia; cuando uno llega a Gales, su edad se aproxima a 570 millones de años. Estas rocas antiguas han sido bautizadas como Cámbrico, debido al nombre romano de Gales. Son las más antiguas que contienen fósiles visibles a simple vista sin la ayuda de microscopios.

Por supuesto existen rocas más antiguas que contienen microfósiles de bacterias, como las encontradas por Barghoorn y Tyler, pero antes de que existieran los modernos métodos de datación no se estaba seguro de su edad. El período con rocas más antiguas que aquellas que contienen los fósiles visibles se llamó Precámbrico porque era más distante en el tiempo que las rocas cámbricas.

Ahora sabemos que el Precámbrico tiene períodos realmente muy antiguos. Este conocimiento nuevo proviene de la distribución de los elementos radiactivos, uranio y potasio, en estas rocas antiguas,

y de sus productos derivados, el plomo y el argón. La desintegración radiactiva es un reloj exacto. Se puede calcular la edad de un trozo de roca midiendo la proporción de uranio y plomo o de potasio y argón.

Otro dato sobre rocas antiguas proviene de la distribución de los isótopos de carbono. Este, junto con el descubrimiento de microfósiles bacterianos en el Arcaico, nos indica que la vida estaba presente en la Tierra desde hace por los menos 3,6 eones. El Precámbrico ahora está cartografiado y dividido en el período Proterozoico, 0,57 a 2,5 eones antes que ahora, y el Arcaico, 2,5 a 4,5 eones antes que ahora. Algunos geólogos llaman Hadiano al primer período, 4,5 a 3,8 eones.

Como el Arcaico, el Proterozoico era un tiempo en el que los ecosistemas de la Tierra estaban poblados por bacterias (los procariotas). En las zonas anóxicas de los sedimentos seguían viviendo las bacterias arcaicas, pero en el océano ligeramente oxidante y en los sedimentos superficiales se desarrollaron unas células vivientes más complicadas, los eucariotas. Estos son los ancestros de las grandes comunidades de células nucleadas, como los árboles y nosotros mismos.

El Proterozoico todavía es un período enigmático de la historia de la Tierra. Por tanto me siento libre para utilizarlo como base en que desarrollar modelos geofisiológicos de lo que hubiera podido ser.

Escribiré este capítulo no como historia sino como un relato de la fisiología de un animal desconocido que vivió hace miles de años y acerca del cual sólo se dispone de una evidencia no mayor que unos pedazos de hueso, exactamente datados a partir de su contenido en isótopos de carbono. Mi interés principal se centra en los procesos geofisiológicos a gran escala que mantenían la Tierra en condiciones constantes y apta para la vida, y en el conocimiento de cómo operaban.

Con los huesos de la Tierra en la mente, consideraré un elemento importante, el calcio, y su papel crucial en todas las cosas vivas, desde nosotros a Gaia. Continuaré dedicando mi atención a aque-

Los otros elementos importantes, oxígeno, carbono e hidrógeno, con su capacidad de regulación y su efecto sobre el clima.

Este capítulo también tratará sobre la geofisiología de los océanos, en particular el difícil problema de si la salinidad total es mantenida sólo por fuerzas químicas y físicas o si es una «maquinación» por parte de Gaia. Aunque el marco de éste capítulo es el Proterozoico, la edad media de la Tierra, la mayoría de aspectos discutidos no son exclusivos de este período, también actuaron en el Arcaico y continúan actuando en el período presente.

Si intentamos empezar en el límite entre el Arcaico y el Proterozoico encontraremos que este límite todavía es discutido. No hay una frontera clara, sólo una tierra de nadie donde los geólogos de campo han colocado sus marcos de acuerdo con su fantasía. El geólogo del Arcaico Euan Nisbet me dice que hay una fecha informalmente aceptada de hace 2,5 eones; aunque algunos prefieren poner la barrera en la fecha marcada por la aparición de una secuencia especial de rocas en Zimbabwe.

Así como las fronteras políticas a menudo fallan en circunscribir regiones étnicas de manera precisa, los límites únicamente basados en consideraciones geológicas no siempre se adaptan al interés de la geofisiología. Como geofisiólogo prefiero poner mis marcas en el tiempo en que el ambiente se hizo predominantemente oxidante - o para expresarlo más profesionalmente-, en la transición de un ambiente dominado por moléculas dadoras de electrones, como el metano, a uno dominado por aceptadoras de electrones, como el oxígeno.

Como suele ocurrir, la incertidumbre acerca de los acontecimientos de hace 2,5 eones es grande y en adelante asumiremos que los registros geológicos y geofisiológicos definen el mismo período de la historia de la Tierra.

Para la geofisiología el aspecto importante de la transición del Arcaico al Proterozoico no es la fecha exacta del acontecimiento, sino qué ocurrió exactamente. Es como la pubertad, un cambio fisiológico profundo pero restringido a un tiempo definido. Los indicadores de la pubertad -la aparición de la barba y el agravamiento de la

voz, o el crecimiento de los pechos- son secundarios al acontecimiento principal.

La aparición de estas características sexuales secundarias es la respuesta a un flujo creciente de hormona pituitaria. Este acontecimiento principal puede localizarse en un tiempo definido, pero las características secundarias se extienden de forma arbitraria en el tiempo.

Entre el Arcaico y el Proterozoico, la aparición del oxígeno como gas dominante en la atmósfera fue el acontecimiento principal que marcó un cambio profundo en el estado geofisiológico de la Tierra. El resultado y las manifestaciones secundarias de este cambio -la aparición de una nueva superficie, de una nueva química de la atmósfera y de nuevos ecosistemas- es probable que se haya distribuido durante un intervalo amplio de tiempo, y que ocurriera en diferentes lugares y en diferentes momentos.

Desde el principio del Proterozoico hasta el momento presente ha habido un exceso de oxígeno libre en forma de gas en el aire. Por un exceso quiero decir que la atmósfera ha contenido más oxígeno que el necesario para oxidar de forma completa los gases reductores de vida corta: metano, hidrógeno y amonio. Geofísicamente hablando, cuando empezó el Proterozoico la separación de dos grandes ecosistemas planetarios, las regiones oxidantes de la superficie y los sedimentos anóxicos, era completa.

El Arcaico, cuyo ambiente estaba lleno de moléculas dadoras de electrones (esto es, agentes reductores), acabó encapsulado, como una región separada que existe sólo cuando el oxígeno no está presente. La sumisión de los sistemas anóxicos al dominio de los oxidantes fue algo así como la conquista por los normandos, de los primitivos sajones, que fueron relegados a una posición subordinada -las clases bajas- de la cual, se dice a menudo, no han escapado nunca.

El cambio de anóxico a oxidante fue un paso crucial en la historia de la Tierra. En el modelo del Arcaico del capítulo anterior (figura 4.2) el final del período se perfilaba como muy repentino, con el oxígeno aumentando desde una proporción muy baja, de un 0,1 a

un 1 por ciento en no más de un millón de años. Por supuesto ello no es más que una consecuencia de un modelo geofisiológico, el cual considera el cambio de un régimen a otro como un suceso impulsado por una realimentación positiva entre el biota y el medio ambiente.

Creo que la diferencia notable entre el Arcaico y el Proterozoico es la composición de la atmósfera y de los océanos, y posiblemente también el clima. El modelo simple de la figura 4.2 suponía que el ciclo del carbono estaba preservado por los metanógenos que devolvían un flujo masivo de metano y dióxido de carbono al aire desde los sedimentos, y que este estado persistió hasta que, de manera bastante rápida, apareció el oxígeno libre.

Probablemente había un poco de oxígeno presente incluso a principios del Arcaico, del mismo modo que hay metano en nuestra atmósfera actual. La diferencia entre el aire arcaico y el aire proterozoico no era una simple cuestión de presencia o ausencia de oxígeno, sino de tendencias netas. En el Proterozoico una bicicleta desechada en aguas someras se hubiera oxidado dando óxido férrico insoluble que se depositaría en el fondo del mar. En el Arcaico se hubiera diluido lentamente en forma de iones ferrosos, solubles en agua, y no hubiera dejado rastro.

Durante el tiempo en que el flujo de metano sobrepasaba al de oxígeno, la atmósfera inferior sólo contendría cantidades traza de oxígeno. Los océanos y las rocas de la superficie, ricas en iones ferrosos y sulfuros que atrapaban el oxígeno, habrían absorbido hasta entonces una proporción del aporte de oxígeno de las cianobacterias de manera que el aire habría quedado en un estado netamente anóxico durante la mayor parte del período arcaico.

No sabemos si el oxígeno del aire aumentó de forma rápida; puede haberse incrementado lentamente o en una serie de etapas. También es importante distinguir entre la presencia y el dominio del oxígeno; el dominio en un sentido químico requiere que la proporción de oxígeno sea dos veces superior a la de metano. La razón para creer que el cambio de régimen, el límite entre el Arcaico y el

Proterozoico, fue abrupto es la evidencia de que una glaciación importante tuvo lugar hace alrededor de 2,3 eones.

Ello puede haber ocurrido como resultado de una caída repentina del metano atmosférico. Este acontecimiento habría venido acompañado por un proceso de enfriamiento porque el metano y sus productos de descomposición son gases de efecto invernadero. También hay razones geofisiológicas que favorecen una transición definida de forma abrupta a un estado oxidante.

Una vez que el oxígeno fotosintético empezó a ser dominante en la atmósfera y los océanos, la acción de la luz solar sobre el oxígeno habría producido radicales hidroxilo que oxidan el metano del aire. También habría habido consumidores alimentándose de la materia orgánica antes de que ésta pudiera llegar a los sedimentos anóxicos, lo que habría privado a los metanógenos del material para la producción de sus emanaciones gaseosas. Esta es la receta para una realimentación positiva en contra del metano y en favor del oxígeno.

Es probable que estos sucesos ocurrieran en forma brusca en lugar de gradual.

Finalmente hay que tener en cuenta la ecología. Los ecosistemas adaptados al mundo arcaico resistirían al cambio en la medida que evolucionaran junto con el medio ambiente. Sin embargo, su resistencia sería como la de una falla cerrada en una zona de terremotos. Tenderían a resistir el cambio, intentando mantener el statu quo, pero cuando éste sobreviniese sería de lo más repentino y devastador.

La transición al dominio del oxígeno habría quedado registrada en las rocas como la glaciación de Gowganda. Sin embargo, el largo período subsiguiente es uno de los más oscuros de la historia de la Tierra. La teoría de Gaia requiere que también en este período se haya producido una evolución fuertemente acoplada entre los organismos vivos y su medio ambiente natural.

A la luz de esta teoría, ¿podemos describir un planeta viviente en el Proterozoico? ¿Qué sistemas reguladores controlaban su funcionamiento?

Cuando los científicos de la Tierra utilizan la palabra «regulación» generalmente piensan en un proceso pasivo en que la entrada y la salida de algún componente o propiedad están en equilibrio. Por el contrario, en geofisiología, regulación implica una homeostasis activa, el mantenimiento de una Tierra adecuada para la vida mediante la interacción de ésta con su medio ambiente.

Las conjeturas que a continuación se exponen sobre la regulación del clima, el oxígeno, la salinidad y otras propiedades del medio ambiente parten de este contexto geofisiológico, en otras palabras, se consideran como si la Tierra fuese un organismo vivo. No se pretende de ningún modo que esto constituya una teleología, pues no se supone que el biota lleva a cabo una predicción o una planificación en la regulación de la Tierra.

Lo que se considera es cómo se puede desarrollar un sistema regulador global a partir de la actividad local de los organismos. No es inverosímil imaginar que alguna bacteria nueva evolucionase en su medio ambiente para conformar un sistema capaz de cambiar la Tierra. Efectivamente, la primera cianobacteria, progenitora del ecosistema que empleaba la energía luminosa para producir materia orgánica y oxígeno, hizo esto.

Si el oxígeno era crucial en la evolución geofisiológica de la atmósfera, el calcio debió ser el elemento determinante en la geofisiología de los océanos y la corteza. El calcio es uno de los elementos alcalinotérreos que ocupan la segunda columna de la famosa tabla periódica de Mendeléiev. Se encuentra después del magnesio y antes del estroncio.

Es el tercer ión en abundancia en el agua de mar, después del sodio y el magnesio. Tendemos a pensar en el calcio como un elemento nutritivo porque es un componente estructural esencial de nuestros huesos y dientes. También es crucial en numerosos procesos fisiológicos internos desde la coagulación de la sangre a la división celular. Es esencial para la vida pero, paradójicamente, muy tóxico en su estado iónico.

Dentro de nuestras células, una concentración de iones calcio que exceda unas pocas partes por millón es letal, una toxicidad com-

parable a la del cianuro; sin embargo, los iones de calcio se encuentran en el agua de mar a niveles diez mil veces superiores.

En los capítulos 2 y 3 explicaba el funcionamiento del modelo del mundo de las margaritas en términos del crecimiento competitivo de los organismos cuando una propiedad ambiental se encuentra estrechamente acotada. Demasiado y demasiado poco no son adecuados; hay un estado óptimo entre el calor tórrido y el frío glacial, entre la superabundancia de alimentos y la muerte por hambre.

Ello es particularmente cierto en el caso del calcio. Imaginemos una bacteria de los océanos primitivos capaz de convertir los iones de calcio, abundantes y solubles en el agua de su medio interno, en carbonato cálcico insoluble. Esta simple reacción habría reducido de forma efectiva la concentración dentro de la célula de los iones potencialmente tóxicos, aislando el calcio en una forma insoluble y segura. En caso de que el calcio se encontrara en exceso en los océanos, tal como usualmente ocurre, dicha capacidad hubiera aumentado las oportunidades de supervivencia de este organismo y de su progenie.

Estos organismos estarían en ventaja en comparación con organismos que simplemente tolerasen la presencia de calcio en exceso. En la zona fótica del océano abierto, el crecimiento de estos organismos habría dado lugar a la deposición de grandes masas de calcio en el fondo oceánico. La lluvia de «conchas marinas» microscópicas, llamadas frústulos por los biólogos marinos, desde la superficie iluminada a las profundidades actúa como una cinta transportadora.

El alimento viaja hacia los consumidores de las zonas inferiores, el océano se limpia y queda transparente, y elementos potencialmente tóxicos como el cadmio se eliminan de las regiones superficiales.

Por otra parte, el dióxido de carbono y el calcio son acarreados y agregados por las comunidades bacterianas para formar las ciudades de rocas planas o en forma de seta denominadas estromatolitos. Como consecuencia de estos procesos, la concentración de iones de calcio en los océanos se habría reducido y la vida habría florecido. La ubicuidad de depósitos de calizas de origen oceánico muestra

que esta actividad fue exitosa y su desarrollo continuado. Contrariamente a este punto de vista algunos geólogos piensan que la deposición de calizas fue un proceso inorgánico.

No veo cómo se puede distinguir entre la cristalización espontánea de carbonato cálcico sobresaturado en el Arcaico y la nucleación inducida por los organismos. Creo que la nucleación de estados supersaturados y otros estados metaestables en la Naturaleza es un proceso geofisiológico clave y que empezó a producirse en el Arcaico.

Como inventor considero que los inventos verdaderamente buenos tienden a desarrollarse y evolucionar. Sólo los inventos poco útiles consisten en un sólo y único paso. Por ejemplo, el cristal semiconductor simple de los primeros receptores de radio de los años veinte evolucionó, de modo hipertrófico, para convertirse en la abundancia de aparatos de silicio actuales.

El proceso de precipitación del carbonato cálcico fue un invento incluso más grande, no solamente conllevó la regulación del calcio, del dióxido de carbono y del clima sino también la gran ingeniería de las estructuras de carbonato cálcico (los estromatolitos). Más adelante, estos mismos procesos evolucionaron de manera que nuestras células disponen de mecanismos intrincados por los que el calcio se deposita en los huesos y dientes.

Todavía más, la deposición biológica de carbonato cálcico puede haber sido determinante en el ciclo endógeno -el lento movimiento de los elementos desde la superficie y el océano a las rocas de la corteza y de nuevo a la superficie. El geólogo Don Anderson ha planteado que la deposición de piedra caliza en el fondo del océano es un factor clave del movimiento de la corteza terrestre.

Según él, en algún tiempo lejano en la historia de la Tierra, se depositó una cantidad de caliza suficiente como para alterar la composición química de las rocas de la corteza del fondo oceánico cerca de los márgenes continentales. Ello dio lugar al suceso denominado por los geólogos transición basalto-ecogilita. Esta transición habría alterado tanto las propiedades físicas de las rocas de la

corteza que habría posibilitado que la gran maquinaria del movimiento de placas empezara a girar.

Don Anderson comentó en su artículo en Science en 1984:

“La Tierra también es algo aparentemente excepcional porque tiene una tectónica de placas activa. Si el dióxido de carbono presente en la atmósfera de Venus se hubiera convertido en caliza, la temperatura de la superficie y manto superior descendería. La transición basalto-ecogilita migraría a profundidades más someras, dando lugar a que la parte inferior de la corteza se hiciese inestable. Puede existir por tanto la posibilidad de que el movimiento tectónico de placas de la Tierra exista debido a la evolución de vida generadora de caliza”

Para mí esta idea es muy interesante, pero admito que la mayoría de los geólogos la encuentra extremadamente improbable. El fenómeno podría haber sido desencadenado por la actividad de algunos organismos capaces de separar una solución diluida de bicarbonato cálcico en creta y dióxido de carbono y así evitar el envenenamiento por calcio.

No sabemos cuándo dio comienzo el movimiento tectónico de las placas continentales. Si está conectado con la vida, la conexión no puede haber existido antes del desarrollo de la precipitación intracelular de carbonato cálcico en los eucariotas, es decir, bien avanzado el Proterozoico.

El estudio de los intrincados procesos biológicos que dan lugar a la segregación y concentración de los elementos de la corteza y el océano en forma de minerales se ha convertido en un tema específico dentro de las ciencias de la Tierra, el de la llamada biomineralización.

La regulación del contenido de sal es uno de los aspectos más interesantes, y sugestivos de los sistemas gaianos. Hay pocos organismos capaces de tolerar la sal a concentraciones por encima del 6 por ciento en peso.

¿Ha sido por casualidad que los océanos se han mantenido siempre por debajo de este límite? ¿O ha sido la evolución estrechamente

acoplada de la vida y el medio ambiente lo que dio lugar a una regulación automática de la salinidad de los océanos?

A menudo se dice que el medio salino interno óptimo para los organismos vivos, que es sorprendentemente similar en una gran variedad de ellos, refleja la composición de los océanos cuando empezó la vida. Es cierto que la salinidad de la sangre de las ballenas, personas, ratones y la mayoría de peces, tanto si viven en el océano como en agua dulce, es la misma. Incluso el fluido circulante del *Artemia*, un pequeño crustáceo que vive en soluciones saturadas de sal, comparte con nosotros la misma salinidad interna.

Pero en mi opinión esto no representa ninguna evidencia de la salinidad de los océanos arcaicos, de la misma manera que los niveles de oxígeno que ahora respiran estos organismos no dan ninguna indicación de la abundancia de oxígeno en los orígenes de la vida.

La mayoría de células sobreviven y se encuentran en condiciones óptimas en un medio cuya salinidad es 0,16 molar (cerca del uno por ciento en peso en disolución acuosa, o salinidad normal). Muchos tipos de células sobreviven en la salinidad del agua de mar, 0,6 molar, pero por encima de 0,8 molar las membranas que mantienen los preciosos contenidos del interior de las células se vuelven permeables o se desintegran completamente. La razón para la acción destructiva de la sal es simple. Las membranas de las células se mantienen juntas por el mismo tipo de fuerzas que cohesionan una burbuja de jabón. A menudo estas fuerzas son muy sensibles a la salinidad del medio, usualmente se debilitan cuando la salinidad es alta.

Uno lo puede comprobar por sí mismo haciendo burbujas de jabón con soluciones salinas de concentración creciente. Por encima de un 10 por ciento de sal no se producen burbujas. Ello es debido a que las moléculas de jabón consisten en una larga cadena de átomos de carbono fuertemente enlazados y rodeada de átomos de hidrógeno enlazados de manera igualmente firme. Uno de los extremos termina en un átomo de carbono enlazado con dos átomos de oxígeno.

Cuando este extremo de la molécula se disuelve en agua ligeramente alcalina, como lo son todas las soluciones de jabón, adquiere una carga negativa. La carga eléctrica negativa hace que el grupo terminal atraiga moléculas de agua y arrastre la cadena de hidrocarburo graso e insoluble dentro de la solución. La sal consiste en iones cloruro negativos e iones sodio positivos. Cuando hay muchos de estos iones en solución, compiten con la carga negativa del jabón en la absorción de moléculas de agua.

En presencia de una cantidad suficiente de sal, el jabón se separa del agua como la nata.

Las moléculas de la membrana celular son más complejas que el jabón: incluyen sustancias como los esteroides (por ejemplo, el colesterol), hidrocarburos, proteínas y fosfolípidos. Las moléculas de fosfolípido son análogas a las del jabón, y constituyen la parte de la membrana más afectada por un incremento en la concentración de sal. Las concentraciones altas de sal alteran las membranas celulares modificando las fuerzas eléctricas que mantienen la membrana en su configuración correcta y compleja.

Por ejemplo, las membranas de los glóbulos rojos de la sangre humana están compuestas de partes aproximadamente iguales de colesterol y lecitina (un fosfolípido), diversas proteínas y otras sustancias grasas. Los glóbulos rojos se mantendrán expuestos a soluciones de sal de hasta 0,8 molar (4,7 por ciento en peso). Por encima de esta concentración la membrana se malogra, y a concentraciones por encima de 2,0 molar la célula se destruye en pocos segundos.

A mediados de los cincuenta pude demostrar mediante experiencias directas que los perjuicios empezaban cuando la lecitina de la membrana de los glóbulos rojos se dispersaba en la disolución salina fuerte. Este tipo de desperfectos por la sal parecen ser generales entre las células vivas y se observan en células de los cinco reinos existentes.

La concentración de sal en los mares actuales siempre es fastidiosamente alta para los organismos vivos. Los mayores, como los peces, mamíferos marinos y algunos crustáceos, disponen de me-

canismos para regular la salinidad interna a un nivel fisiológico (0,16 molar). Estos animales tienen que trabajar para contrarrestar la pérdida de agua desde su medio interno, es decir para evitar ser estrujados por la presión osmótica.

Tienen que gastar energía en bombear agua contra la diferencia de presión osmótica entre su interior y el mar. La presión es del orden de la necesaria para bombear agua a una altura de 140 m en contra de la gravedad, alrededor de unas mil veces más alta que la presión sanguínea de los seres humanos. Las ventajas de un medio interno de bajo contenido en sal deben de ser considerables para requerir semejante inversión. Para una célula pequeña o una bacteria, la regulación a escala individual es un lujo que está mucho más allá de sus posibilidades.

Y no sólo en lo concerniente a la salinidad. Consideremos la temperatura, por ejemplo. Para que un microorganismo pudiera mantener tan sólo un grado de diferencia respecto a sus alrededores sería necesario el consumo de mucho más oxígeno y alimento que el que puede atravesar su superficie. No sólo eso, sino que un gradiente de un grado de temperatura a través de la membrana celular generaría una presión osmótica termal de 56 atmósferas, mucho más de lo que puede resistir una membrana celular.

El estrés salino se produce frecuentemente durante la desecación o la congelación. Cuando las células se congelan, se forma hielo puro y la solución salina circundante se concentra. La congelación y la desecación deben haber sido riesgos frecuentes en los orígenes de la vida, y desde entonces hasta ahora no se ha desarrollado ninguna respuesta directa a estos problemas.

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

Son como aquellos excéntricos de nuestra sociedad cuya supervivencia depende del sustento que les podemos proporcionar pero que raramente podrían sobrevivir solos.

Por tanto, la mayor parte de la vida se encuentra limitada a una concentración máxima de sal de alrededor de 0,8 molar.

Esto no es mucho más que en las zonas más saladas del océano, en las que la salinidad alcanza 0,68 molar. Es un valor que se sobrepasa frecuentemente cuando la marea retrocede, dejando a los organismos atrapados en charcos de agua marina que se secan por evaporación en la orilla.

El problema de la salinidad debe haberse presentado ya en las bacterias arcaicas. Su respuesta al problema consistía en sintetizar ciertos compuestos solubles denominados betaínas de azufre y nitrógeno. Estos solutos neutros sustituyen a la sal y no son tóxicos para la célula. Cuando estos compuestos están presentes en las células y en el medio, la congelación o la desecación ya no dan lugar a una concentración de sales nociva. Incluso así hay que pagar un precio por la síntesis de estas betaínas antisalinas.

Alrededor del 15 por ciento del peso seco de las algas costeras es betaína, lo que representa una desviación considerable de energía que en caso contrario estaría disponible para el organismo. Por tanto, es evidente que mantener los océanos tan diluidos como sea posible -ciertamente mantenerlos lejos de la concentración crítica de 0,8 molar- representa una ventaja para el biota.

Los problemas relacionados con la regulación de la salinidad exceden en dificultad a cualquier obra de ingeniería que el hombre haya construido hasta el momento presente en el planeta. Las bacterias del Arcaico habrían podido modificar fácilmente el pequeño compartimiento de la atmósfera para adaptarlo a sus necesidades. Sin embargo, la vasta masa de los océanos, unas diez mil veces mayor, era mucho más difícil de manipular.

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

cas. La magnitud total de estos arrecifes dejaría pequeña cualquier construcción humana concebible. Incluso es posible que el proceso de formación de lagunas haya sido favorecido por el plegamiento de las rocas en los márgenes continentales como consecuencia del movimiento de las placas tectónicas.

En la tabla 5.1 se indica la composición de sales de los océanos. La sal en solución, meteorizada a partir de las rocas, entra continuamente desde los ríos y también desde el interior de la Tierra en las dorsales oceánicas, que se encuentran en el fondo de los mayores océanos. En el océano la sal no se comporta como una sustancia única, el cloruro sódico, sino que se encuentra en forma de iones sodio (positivo) y cloruro (negativo).

Estos se comportan como dos entidades separadas e independientes. Tanto el ión sodio como los otros iones positivos (potasio, magnesio y calcio) tienen tiempos de residencia relativamente cortos en el océano. Son eliminados por procesos químicos y bioquímicos, y también por reacciones químicas hidrotermales en las dorsales oceánicas.

Su destino final es la deposición en forma de sedimentos, arcillas, calizas y dolomitas. Básicamente, el problema de la salinidad para el biota es de hecho el problema de desembarazarse de los iones cloruro negativos.

Tabla 5.1. SALES OCEANICAS

<i>Especies iónicas</i>	<i>Abundancia (moles)</i>	<i>Tiempo de residencia (millones de años)</i>
Sodio	0,47	56,0
Magnesio	0,05	11,0
Calcio	0,01	0,9
Potasio	0,01	5,5
Cloruro	0,53	350,0
Sulfato	0,03	7,9

Fuente: M. Whitfield, «The World Ocean: Mechanism, or Machination», Interdisciplinary Science Reviews, 6 (1981), 12-35.

Desde el punto de vista químico, el cloruro es bastante parecido a un átomo de argón, que es un gas totalmente inerte. Es una molécula esférica, escurridiza y lisa con escasa o nula tendencia a unirse a algo. No hay ningún intercambio bioquímico significativo con el cloruro.

Unos pocos sistemas poco comunes pueden generar cloruro de metilo a partir de sal, pero el ciclo de este compuesto es demasiado poco importante como para afectar a la salinidad del océano. Además, el cloruro presente en la molécula de cloruro de metilo pronto es reconvertido en ión cloruro y es arrastrado por la lluvia volviendo al mar. Los iones cloruro son eliminados de los océanos físicamente, mediante la transferencia de agua de mar a lagunas evaporíticas.

El agua atrapada en estas lagunas se calienta bajo el Sol y se evapora; el vapor de agua se desplaza a través de la atmósfera y eventualmente se condensa en otro sitio en forma de lluvia -agua pura- que fluye y se diluye en el océano.

La sal, representada por el ión cloruro dominante y los iones positivos que deben acompañar le para mantener nula la carga iónica total, es dejada atrás en forma de capas cristalinas. Estas lagunas evaporíticas se encuentran en muchos lugares de los márgenes continentales. Existen muchas lagunas fósiles debajo de la superficie terrestre, a veces incluso bajo el océano mismo.

Para que se formen estas lagunas se necesitan barreras que las separen del mar. La formación de éstas ¿podría haber formado parte de la evolución estrechamente acoplada entre la vida y las rocas o sólo es un resultado del azar? El proceso clave en esta actividad es la deposición de carbonato cálcico. El dióxido de carbono en el aire reacciona continuamente con las rocas alcalinas de la superficie terrestre para formar bicarbonatos.

Una reacción importante de este tipo es la que se produce entre rocas de silicato cálcico y el dióxido de carbono disuelto en el agua superficial. El producto final es una disolución de ácido silícico y bicarbonato cálcico que fluye con los ríos hacia el océano. En ausencia de vida los iones de calcio y bicarbonato pueden coexistir en

un océano ligeramente ácido y el aporte continuo de ambos daría lugar, a la larga, a la cristalización espontánea de carbonato cálcico. Sin embargo, se trataría de una deposición más o menos aleatoria.

Los depósitos de caliza en el mundo real están relacionados en su mayor parte con la acción de los organismos vivos. La caliza no se deposita de forma aleatoria o de acuerdo con lo previsto por la física y la química. La precipitación de carbonato cálcico por colonias de microorganismos tiene lugar de manera predominante en las aguas someras alrededor de los márgenes continentales donde la abundancia de nutrientes y bicarbonato cálcico es más alta.

Sin ninguna planificación o previsión, los constituyentes de aquellas estructuras vivas, los estromatolitos calizos, se concentrarían en la costa y a la larga formarían lagunas en las que el agua de mar se evaporaría progresivamente depositándose sal. Al principio la formación de arrecifes sólo habría tenido un efecto local pero, a lo largo del tiempo, la mera presencia de la masa de caliza, habría empezado a afectar la corteza deformable de la superficie terrestre hundiéndola, y aumentando así el tamaño de las lagunas.

Siempre habría nuevos constructores de roca que colonizarían la superficie de un arrecife a medida que el terreno se hundiese, lo que tendería a mantener intacta la laguna.

Como Don Anderson ha sugerido, si el movimiento de la corteza terrestre depende de la deposición continua de carbonato cálcico en el mar, los arrecifes calizos habrían dado lugar a sucesos tan complicados como la formación de montañas y el plegamiento de rocas en los márgenes continentales. Ello a su vez habría ampliado el rango de zonas costeras en que podrían formarse lagunas evaporíticas.

A lo largo del tiempo ha ido incorporándose sal a los océanos desde la litosfera y eliminándose de nuevo. Una parte de esta sal se deposita en lechos evaporíticos y queda enterrada por los sedimentos. Estos depósitos pueden quedar temporalmente expuestos al aire de modo recurrente por los movimientos tectónicos y la meteorización, liberándose de nuevo los contenidos al mar.

Sin embargo, también hay nuevas lagunas evaporíticas formándose continuamente.

El balance de erosión y formación parece haber mantenido secuestrada en lechos evaporíticos una cantidad de sal suficiente para mantener los océanos con un bajo contenido de sal y aptos para la vida. La evidencia de que la formación de lagunas y su mantenimiento depende de los microorganismos marinos es importante.

Una vez tuve el placer de unirme a una expedición, liderada por Lynn Margulis, a las comunidades microbianas algales que se forman en las lagunas evaporíticas de Baja California en México (tal como se ve en la figura 5.1). Estas se encuentran en la costa oeste de esta lengua de tierra larga y estrecha que cuelga bajo San Diego y que separa el Golfo de California del océano Pacífico.

Allí pude constatar de primera mano la sutil economía de los tapices bacterianos que cubren la laguna. Las comunidades microbianas rojas y verdes de la superficie actúan como un impermeable, impidiendo que la sal se diluya en el agua de lluvia y sea lavada hacia el océano. Incluso, durante un tiempo toda la laguna estuvo sumergida por unos metros de agua dulce.

Durante dos años esta agua había estado evaporándose y diluyéndose sin destruir ni las comunidades bacterianas ni los lechos evaporíticos de debajo. La entrada de agua de lluvia rebaja regularmente su salinidad y ayuda al crecimiento de fotosintetizadores en la superficie, los productores primarios que proporcionan alimento y energía a las comunidades de debajo.

Los cristales de sal en o cerca de la superficie están protegidos con su propio barniz contra la disolución espontánea por el agua de lluvia.

¿Es todo ello una enorme y no planificada obra pública de Gaia?

Todos los pasos, desde la disminución individual de iones de calcio dentro de las células de un organismo vivo hasta los movimientos de las placas tectónicas, tienden a mejorar el medio ambiente para los organismos responsables de los mismos.

Sin embargo las relaciones entre biomineralización, acumulación salina y tectónica de placas son tan débiles que la mayoría de científicos piensan que se encuentran relacionadas aleatoriamente y no geofisiológicamente.

Tengo que continuar preguntándome sobre los límites de la manipulación gaiana e investigar el criterio correcto a partir de la pregunta

- ¿Qué Tierra habría existido en ausencia de vida?
- ¿Habrían precipitado calizas en los márgenes continentales para formar lagunas evaporíticas?
- ¿Se habría depositado sal en las mismas?
- ¿O habría sido lavada de nuevo hacia el océano por la lluvia en ausencia de un impermeable vivo en forma de tapiz microbiano? - ¿Se depositaría caliza en los lugares adecuados y con la intensidad necesaria para que las placas tectónicas empezasen a moverse?

Quizás es improbable, pero recordemos que se ha dispuesto de miles de millones de años para el desarrollo de innovaciones geofisiológicas y su examen por selección natural. Deberíamos considerar la posibilidad de que este largo período hubiera sido suficiente para afinar la tosca geología en una geofisiología uniformemente regulada.

Hasta ahora sólo hemos considerado obras de ingeniería a gran escala. ¿Qué podemos decir de los trabajadores? Durante el Proterozoico evolucionó un nuevo tipo de células, las que tienen núcleo, denominadas eucariotas. Estas son células que contienen estructuras en su interior, y otros orgánulos (como los cloroplastos, los corpúsculos pigmentados de verde que llevan a cabo la fotosíntesis).



5.1. Las lagunas evaporíticas de Laguna Figueroa, Baja California, México. Las dunas de arena forman una barrera a través de la cual se filtra agua de mar. El agua se evapora en las lagunas y la sal cristaliza formando depósitos evaporíticos. La superficie de las lagunas está cubierta a menudo de comunidades microbianas llamadas tapices.

Lynn Margulis me explicó que estas células más complejas son comunidades de bacterias que tiempo atrás vivieron libremente, pero que ahora están encerradas en la membrana exterior de una de ellas. En su libro *Early Life* [la vida primitiva] nos explica cómo en el Proterozoico se estableció el escenario para la aparición de estas células nuevas y más poderosas. Fue un salto evolutivo como el que ocurrió en el Arcaico, cuando los ecosistemas de fotosintetiza-

dores que usaban dióxido de carbono llegaron a un equilibrio con los metanógenos que devolvían el carbono a la atmósfera en forma de metano y dióxido de carbono.

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

Pero en poco tiempo aparecerían consumidores, organismos que aprendieron a comer alimentos frescos y que ingerían a los fotosintetizadores. Las células no tienen boca pero pueden ingerir otras células englobándolas en una cavidad de su membrana, un proceso llamado fagocitosis. La cavidad penetra en el interior de la célula y luego se disuelve, dejando al cautivo atrapado dentro.

El destino normal sería la digestión, pero a veces se invierten los papeles y el organismo ingerido se convierte en agresor. Los bacilos de la tuberculosis y la lepra son un ejemplo de esto, atacando los fagocitos que los ingieren en lugar de sucumbir víctimas del poderoso sistema digestivo de los mismos.

Pero el precio de la guerra raramente es el genocidio. En lugar de eso los enfrentamientos pueden derivar hacia una coexistencia pacífica mutuamente beneficiosa para la víctima y el agresor. De esta manera los cloroplastos tienen como ancestros las cianobacterias arcaicas, y hoy en día suministran energía a las comunidades de coles y secoyas.

Aunque tratada superficialmente por los biólogos del siglo XIX, el reconocimiento de esta asociación poderosa de orgánulos trabajando dentro de las células en un proceso de simbiosis, llamado endosimbiosis, se considera una contribución de Lynn Margulis más que de ningún otro científico. Los endosimbiontes ampliaron y expandieron las posibilidades de gestión planetaria del biota y constituyeron la característica principal de la historia de la Tierra durante el Proterozoico.

La formación de sociedades proporciona mayor poder al grupo que el que corresponde a sus componentes individuales aunque esto

siempre tiene algún precio. Para las primeras bacterias (los procariontes) el envejecimiento no era un problema. No tenían núcleo ni orgánulos y portaban su información genética codificada en unas pocas hebras de ADN dentro de la membrana celular (ver figura 5.2). La información genética perdida por una bacteria individual durante su breve vida se recuperaba por el intercambio con otros individuos de plásmidos y otras piezas de software polimérico.

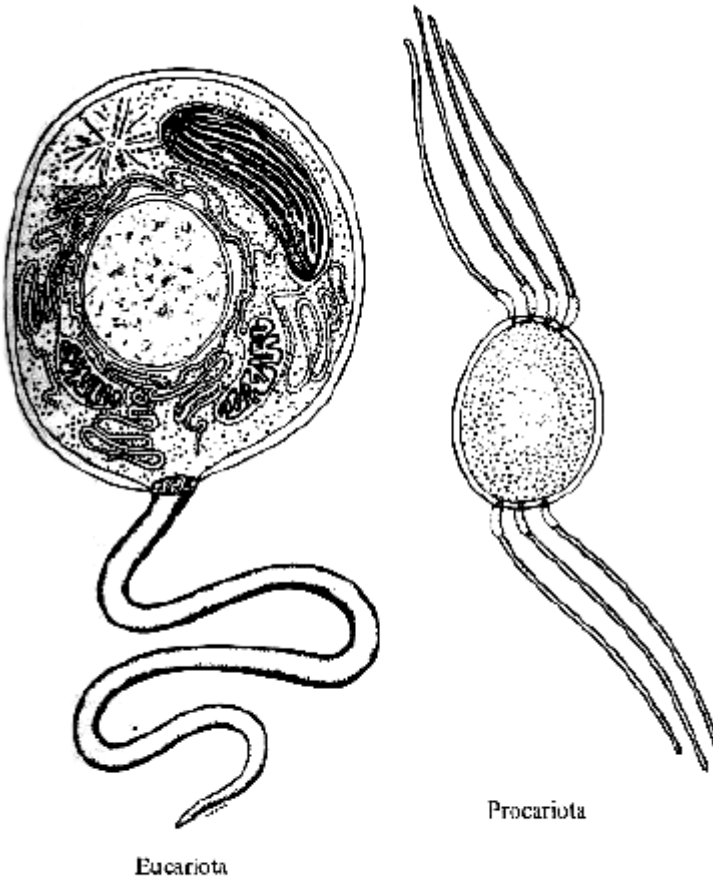
Sin embargo, para las células eucariotas, con sus orgánulos y su organización interna compleja (figura 5.2), donde cada parte contiene un conjunto diferente de instrucciones genéticas, la pérdida de información en un orgánulo puede dar lugar a la muerte. La invención de un método y un mecanismo para la transferencia deliberada de información entre las células antes de la división redujo grandemente las posibilidades de un desenlace fatal.

Fue esta necesidad la que llevó a la invención del sexo. Pero esta es una historia demasiado interesante como para intentar resumirla aquí y se explica con pleno detalle en el libro de Lynn Margulis y Dorion Sagan *The Origins of Sex* [Los orígenes del sexo].

Una cuestión no resuelta acerca del proterozoico es cuál era la concentración de oxígeno. ¿Permaneció alrededor del 0,1 al 1 por ciento o aumentó hasta los niveles actuales o incluso más?

El oxígeno libre tiene dos fuentes: la fuga de hidrógeno al espacio y la deposición de carbono y azufre. El secuestro de hidrógeno elemental por carbono o azufre siempre deja oxígeno libre detrás. Como vimos en el capítulo anterior, una vez que aparece oxígeno libre en el aire, la fuga de hidrógeno se reduce progresivamente.

Ello es debido a que en una atmósfera de oxígeno sólo pueden existir trazas de hidrógeno o gases que lleven hidrógeno, como el metano. La única excepción es el agua, que no puede oxidarse más, y queda confinada a la atmósfera inferior por las bajas temperaturas que existen en la base de la estratosfera. Ahí queda literalmente congelada, y la parte superior de la atmósfera sólo contiene unas pocas partes por millón de vapor de agua.



5.2. Comparación de las estructuras celulares eucarióticas y procarióticas. Los eucariotas se diferencian en que poseen orgánulos contorneados por membranas, entre los que se incluye el núcleo, las mitocondrias y los cloroplastos (dibujo de Christie Lyon).

La tasa actual de fuga de hidrógeno al espacio se encuentra limitada por la sequedad del aire superior y es de sólo 300.000 toneladas por año. Ello es equivalente a casi 3 millones de toneladas de agua y dejaría detrás un exceso de 2,5 millones de toneladas de oxígeno. Parece mucho, pero una pérdida de agua de esta magnitud habría eliminado menos del uno por ciento de los océanos a lo largo de toda la existencia de la Tierra.

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

Este proceso de separación empieza con la fotosíntesis, la cual divide el dióxido de carbono en carbono y oxígeno. Este penetra luego en el aire, y en las partes vivas y muertas de las plantas y bacterias. La mayor parte de este material carbonoso es oxidado por los consumidores pero un poco, cerca del 0,1 por ciento, queda enterrado de manera más o menos permanente.

Una parte del carbono de los sedimentos interviene en la reducción de los sulfatos a sulfuros. La deposición de sulfuros también deja un incremento neto de oxígeno en el aire. El carbono y los sulfuros quedan incluidos en las arcillas y calizas sedimentarias. La sedimentación puede llevarse a cabo de manera que se formen combustibles fósiles, carbón y petróleo, aunque éstos sólo representan una pequeña proporción del carbono total y del azufre de los sedimentos. La deposición de todo este material oxidable es como un préstamo en la cuenta del oxígeno.

La deuda no se presenta mientras el carbono está enterrado o perdido en el interior de la Tierra, lo que permite que quede oxígeno libre en circulación en el aire.

En la actualidad se pierden en el suelo unos 100 millones de toneladas de carbono cada año -el equivalente a la emisión de 266 millones de toneladas de oxígeno-. Esto no quiere decir que el oxígeno de la atmósfera esté aumentando; esta contribución anual se gasta en los materiales oxidables liberados por los volcanes, la meteorización y los procesos del fondo marino.

La tasa de deposición de carbono ha sido constante a lo largo de la historia de la vida en la Tierra; hay muy poca diferencia entre el Arcaico y ahora. El misterio puede resolverse si recordamos que debido a que sólo había trazas de oxígeno, la proporción de consumidores aeróbicos sería menor que ahora. Esto significa que los

metanógenos y otros organismos anaeróbicos digerían casi todos los productos fotosintéticos y dejaban en los sedimentos la misma cantidad de carbono que ahora.

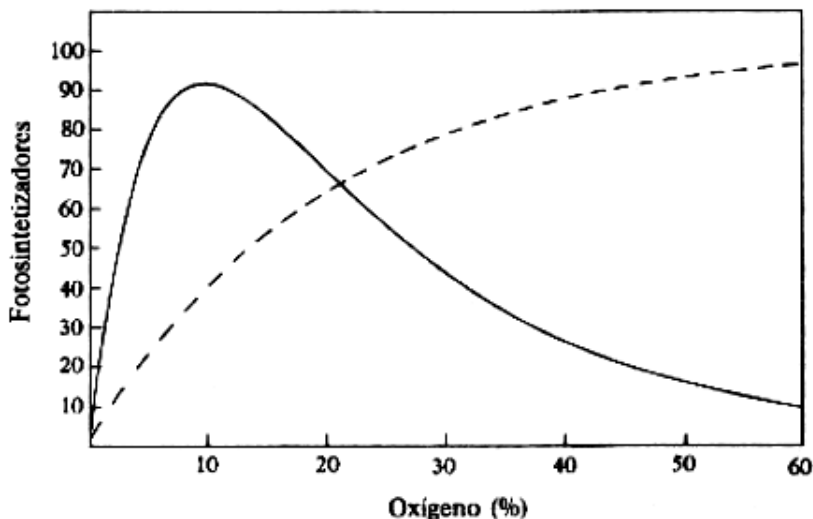
En parte, la elevada tasa actual de fotosíntesis se debe seguramente al reciclado rápido de carbono por los consumidores que respiran oxígeno. Estos metabolizan el 97,5 por ciento de los productos fotosintéticos, dejando sólo el 2,5 por ciento para los anaerobios.

En el Proterozoico había consumidores que se alimentaban de materia orgánica y utilizaban el oxígeno para metabolizarla. Su actividad probablemente haya sido menor que ahora, pero mayor que en el Arcaico.

La cuestión clave es que la producción de oxígeno viene determinada por la cantidad de carbono depositado y esto a su vez depende de la cantidad de productos de los fotosintetizadores que llegan al sector anóxico. Evidentemente, si los consumidores devorasen toda la materia orgánica no quedaría ninguna para ser enterrada, y por tanto, no habría fuente de oxígeno. Si recordamos que la tasa de deposición de carbono ha sido más o menos constante entonces la conclusión es que el aporte de oxígeno de esta fuente también ha sido constante. En el Arcaico todo este oxígeno se gastaba en oxidar las sustancias reducidas presentes en el ambiente y las introducidas en el mismo.

Pero cuando se empezó a disponer de oxígeno libre, los consumidores comenzaron a utilizar una proporción creciente del mismo. La permanencia de ecosistemas anóxicos en el Arcaico aseguraba el enterramiento continuo de carbono y un aporte continuo de oxígeno al aire. Estos acontecimientos se resumen en la tabla 6.1.

Entonces, ¿qué es lo que determinaba el nivel de oxígeno en el aire?



5.3. El efecto del oxígeno en el crecimiento de los organismos (línea continua) y el efecto de la presencia de organismos en la abundancia de oxígeno (línea a trazos). El punto de intersección de estas curvas corresponde al nivel de oxígeno en que el sistema se encuentra regulado.

5.3. El efecto del oxígeno en el crecimiento de los organismos (línea continua) y el efecto de la presencia de organismos en la abundancia de oxígeno (línea a trazos). El punto de intersección de estas curvas corresponde al nivel de oxígeno en que el sistema se encuentra regulado.

Desde el punto de vista de la geofisiología podemos suponer que la toxicidad inherente al oxígeno no fue totalmente vencida por los sistemas antioxidantes y por los enzimas de los organismos del sector aeróbico. En estas circunstancias el oxígeno mismo podría haber establecido su propio límite inferior y un límite superior para la mayor parte de los seres vivos.

Tales propiedades pueden estar geofisiológicamente reguladas.

Las figuras 5.3 y 5.4 muestran cómo puede haber tenido lugar esta regulación en el Proterozoico. La figura 5.3 representa los efectos del oxígeno en el crecimiento del ecosistema aeróbico y el efecto

del tamaño del ecosistema aeróbico sobre el oxígeno. La línea continua es la relación entre el nivel de oxígeno y la población de consumidores que lo utilizan; a niveles de oxígeno bajos no podrían metabolizar y a niveles altos resultarían envenenados por el oxígeno.

La línea de trazos indica la relación entre la población del ecosistema aeróbico y el nivel estacionario de oxígeno; a más fotosintetizadores más oxígeno. Las dos curvas tienen un punto de intersección en donde el nivel de oxígeno sería mantenido en homeostasis por el sistema.

La figura 5.4 muestra los cálculos de una simulación por ordenador en que fotosintetizadores, consumidores y anaerobios coexisten en el planeta antes, durante y después de la aparición del oxígeno. Se supone que, como en la Tierra, la tasa de deposición de carbono es constante y que una tasa de renovación decreciente de rocas y gases reducidos oxida el planeta hasta que el oxígeno se convierte en el gas dominante.

Entonces el oxígeno aumenta hasta que las propiedades geofisiológicas del sistema establecen un nuevo nivel estacionario en el que la abundancia de oxígeno se mantiene constante por un balance entre la cantidad de carbono enterrada y la cantidad de material reductor expuesto. El cuadro inferior ilustra las variaciones de temperatura planetaria en comparación con las de un planeta sin vida de la misma composición. El cuadro intermedio muestra la variación de los gases oxígeno, dióxido de carbono y metano.

El cuadro superior muestra los niveles de población de las diferentes formas de vida.

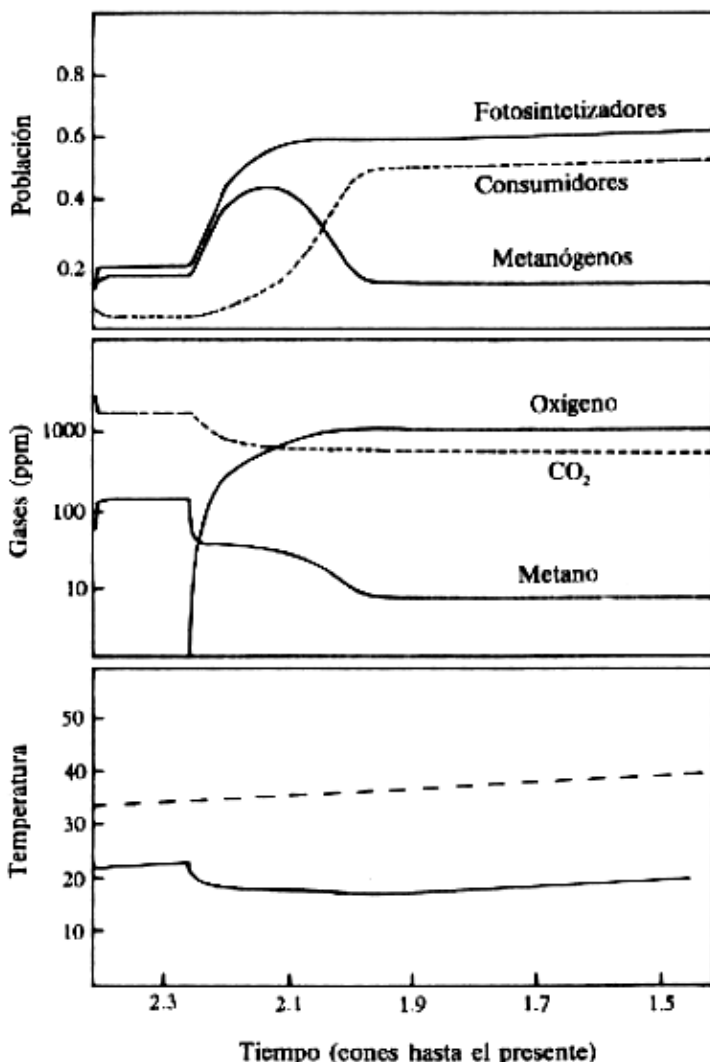
Este modelo es una aproximación lineal de los modelos climáticos de los capítulos 2 y 3, en que se demuestra que se puede regular la temperatura de un planeta imaginario mediante el crecimiento competitivo de las margaritas de diferentes colores.

El modelo de la figura 5.4 establece que, a largo plazo, la cantidad del carbono producido por los fotosintetizadores acumulada en los sedimentos es constante y que esta fuente de oxígeno también es constante. El proceso daría lugar a un agotamiento de la capacidad

de absorción de oxígeno en las aguas y sedimentos anóxicos (serían oxidados), con lo que al final del Arcaico la concentración de oxígeno en la atmósfera subiría abundantemente.

La presencia de un exceso de oxígeno habría incrementado la tasa de meteorización y por tanto el aporte de nutrientes que a su vez habría posibilitado un ecosistema mayor. Ello redundaría en la sedimentación de más carbono y la subsiguiente subida de oxígeno. La presencia de este gas en la atmósfera se habría incrementado hasta que su toxicidad determinase un límite ambiental para los organismos vivos.

Esta situación límite produciría una reducción del sector anaerobio en el que se deposita el carbono, que se reduciría a un tamaño equivalente al del Arcaico, y la producción y pérdida de oxígeno se equilibrarían por la exposición de sustancias oxidables durante la meteorización.



5.4. Modelo de la transición del Arcaico al Proterozoico. El cuadro inferior muestra las variaciones climáticas en un mundo sin vida (línea a trazos) en comparación con un mundo vivo (línea continua). Obsérvese la caída repentina de temperatura cuando aparece el oxígeno. El cuadro intermedio muestra la abundancia de diversos gases atmosféricos (dióxido de carbono, línea de trazos; oxígeno y metano, línea continua). El cuadro superior ilustra los cambios en la población de los ecosistemas durante la transición y después. Obsérvese cómo los fotosintetizadores y los metanógenos aumentan cuando aparece el oxígeno por primera vez y cómo los metanógenos decaen a un nivel estacionario cuando se establecen por completo los consumidores que respiran oxígeno (línea a trazos).

En cierto sentido los ecosistemas aeróbicos existían ya en los albores de Gaia, desde el momento en que las primeras cianobacterias convirtieron luz solar en energía química de alto potencial y fueron capaces de sintetizar compuestos orgánicos y oxígeno a partir de agua y dióxido de carbono.

A medida que se extendían, estas cianobacterias habrían ocupado siempre una posición superficial para disfrutar y alimentarse de la luz solar.

Los sistemas anóxicos, aquéllos cuyo alimento eran los cadáveres y los productos de las cianobacterias, habrían proliferado de modo natural por debajo de los fotosintetizadores para aprovecharse de la lluvia de alimento desde arriba. Desde el principio habría existido una segregación entre estos dos ecosistemas, y un gradiente de concentración de oxígeno que disminuiría desde la región de su producción.

En el mundo real, el ciclo del oxígeno no puede desconectarse del ciclo del dióxido de carbono; una subida del oxígeno implica una caída del dióxido de carbono. Por otra parte, el ciclo del dióxido de carbono está acoplado con el clima, y éste a su vez afecta tanto al crecimiento de los consumidores como de los productores.

El bucle de realimentación entre dióxido de carbono y clima estabilizaría el sistema de forma adicional. Una vez superada la crisis del oxígeno el Proterozoico pudo ser un tiempo confortable para Gaia, a excepción hecha de la molestia persistente de los asteroides. El nivel natural de dióxido de carbono habría proporcionado un clima agradable y no se necesitaría un gran esfuerzo para regularlo.

Una consecuencia curiosa de la aparición de oxígeno fue la generación de los primeros reactores nucleares del mundo. La energía nuclear, desde su concepción, raramente ha sido descrita excepto hiperbólicamente. Se ha dado la impresión de que diseñar y construir un reactor nuclear es una hazaña única de la ciencia física y de la creatividad de la ingeniería. Es sorprendente encontrar que en el Proterozoico una débil comunidad de modestas bacterias construyó

una serie de reactores nucleares que funcionaron durante millones de años.

Este acontecimiento extraordinario ocurrió hace 1,8 eones y se produjo en un lugar que ahora se denomina Oklo, en el Gabón, África, y fue descubierto de modo enteramente accidental. En Oklo hay una mina que proporciona uranio para la industria nuclear francesa. En los años setenta, se encontró que una partida de uranio de Oklo estaba mermada en el isótopo fisionable uranio 235.

El uranio natural siempre tiene la misma composición isotópica: 99,27 por ciento de uranio 238, 0,72 por ciento de uranio 235 y trazas de uranio 234. Sólo el uranio 235 puede actuar en las reacciones en cadena necesarias para la producción de energía o para las explosiones. Naturalmente este isótopo fisionable es vigilado celosamente y su proporción en el uranio se examina amplia y repetidamente. Imaginemos la sorpresa con que debieron encontrarse en la agencia francesa de energía atómica cuando se descubrió que la partida de uranio tenía una proporción mucho más pequeña de uranio 235 que lo normal.

¿Algún grupo clandestino en África o Francia había encontrado la manera de extraer el isótopo potencialmente fisionable y lo estaba utilizando para un uso terrorista con armas nucleares?

En un principio cualquier explicación siniestra parecía probable. Cuando se encontró la verdad no sólo consistió en un asunto científico fascinante sino que debió representar un alivio inmenso para las mentes turbadas con imágenes de toneladas de uranio 235 puro en manos de fanáticos.

La química del uranio es tal que es insoluble en agua en condiciones anaerobias, pero bastante soluble en presencia de oxígeno. Cuando hubo una cantidad suficiente de oxígeno en el Proterozoico para que las aguas subterráneas se hiciesen oxidantes, se empezó a disolver el uranio en las rocas y, en forma de ión uranilo, se convirtió en uno de los muchos elementos traza presentes en las corrientes de agua.

La concentración de las disoluciones de uranio no habría sido superior a unas pocas partes por millón, y el uranio no habría sido

más que otro ión en solución. En lo que ahora es Oklo esta corriente de agua fluía por un tapiz algal que incluía microorganismos con una extraña capacidad para captar y concentrar uranio de forma específica. Estos desarrollaron su tarea inconsciente tan bien que al final se depositó suficiente óxido de uranio puro para iniciar una reacción nuclear.

Cuando se concentra una cantidad superior a una cierta “masa crítica” de uranio que contiene el isótopo fisionable se produce una reacción en cadena. La fisión de los átomos de uranio produce neutrones libres que provocan la fisión de más átomos de uranio, lo que a su vez produce más neutrones y así sucesivamente.

La reacción se estabiliza cuando los neutrones producidos compensan a los que escapan o son absorbidos por otros átomos. Este tipo de reactor no es explosivo, de hecho está autorregulado. Un aspecto fundamental del reactor es la presencia de agua, que tiene la función de retardar y reflejar neutrones. Cuando aumenta la producción de energía el agua hierve y el reactor se frena. Una reacción de fisión nuclear es un tipo perverso de fuego, pues quema mejor cuando está bien empapado con agua.

Los reactores de Oklo funcionaron bien a la escala de un kilovatio durante millones de años y utilizaron una cantidad importante de uranio 235 para este fin.

La presencia de los reactores de Oklo confirma la existencia de un ambiente oxidante en el Proterozoico porque en ausencia de oxígeno el uranio no es soluble en agua. Cuando empezó la vida, hace 3,6 eones, el uranio estaba mucho más enriquecido en el isótopo 235. Este isótopo se desintegra más rápidamente que el isótopo más común, el 238, y en los principios de la vida la proporción de uranio fisible no era de un 0,7 por ciento como ahora sino de un 33 por ciento. Un uranio tan enriquecido hubiera sido una fuente de espectaculares fuegos artificiales nucleares si alguna bacteria hubiera sido tan poco juiciosa como para concentrarlo. Ello también sugiere que la atmósfera no era oxidante en el Arcaico.

Las bacterias no podían haber discutido los costes y beneficios de la energía nuclear. El hecho de que los reactores funcionasen du-

rante tanto tiempo y de que hubiera más de uno de ellos sugiere que tiene que haber habido un reaprovisionamiento de uranio y que la radiación y los residuos nucleares no constituyeron un problema para este ecosistema antiguo. En este sentido, la distribución de productos de fisión estables alrededor del lugar de reacción proporciona una evidencia valiosa que sugiere que los problemas de almacenamiento de residuos radiactivos no son tan complicados o tan peligrosos como indican los pronunciamientos enfervorizados de los movimientos antinucleares.

Los reactores de Oklo son un ejemplo espléndido de homeostasis geofisiológica. Muestran cómo se puede segregar y concentrar minerales específicos en estado puro, y ello constituye un acto de profunda negentropía en sí mismo y también un inestimable sistema de numerosos procesos geofisiológicos combinados.

La separación, casi en estado puro, de sílice que realizan las diatomeas y de carbonato cálcico que llevan a cabo los cocolitofóridos y otros organismos vivos también constituyen ejemplos de este tipo de procesos que han tenido un efecto profundo en la evolución de la Tierra.

Si algún descendiente del químico extraterrestre que visitó la Tierra en el Arcaico hubiera vuelto en el Proterozoico no habría encontrado una Tierra tan diferente a la de ahora. El cielo sería de un azul más pálido y quizá tendría una menor cubierta de nubes.

En la playa, el mar sería azul-grisáceo en lugar de marrón como en el Arcaico. Tierra adentro, tras las dunas de arena y los guijarros, estarían los tapices bacterianos, animados por algas verdes y amarillo oro, que protegerían el sector anóxico donde se encontrarían los lechos evaporíticos con sus capas profundas de sal gema acumulada durante miles o incluso millones de años. Fuera, en el mar, encontraríamos también las estructuras rocosas de los estromatolitos.

Me pregunto si nuestro extraterrestre habría observado una propiedad geofisiológica importante de los arrecifes que recientemente ha sido observada en los arrecifes de coral. Fotogramas de satélite han mostrado que la longitud de onda de las olas de las aguas cercanas

a los arrecifes es inusual e inesperada teniendo en cuenta los vientos superficiales y las características oceánicas.

La investigación subsiguiente ha descubierto el hecho notorio de que los microorganismos coralinos secretan una sustancia lipídica que forma una capa monomolecular en la superficie del océano. Esta altera la tensión superficial influyendo sobre las olas. Es interesante especular sobre el desarrollo geofisiológico de esta interesante propiedad de los microorganismos, preguntarse cuándo se desarrolló y si es un mecanismo para protegerse de los embates del mar.

Durante el Proterozoico continuó la lluvia constante de asteroides. Aparte de numerosos objetos pequeños, hubo por lo menos diez que causaron daños a Gaia cuya severidad es comparable a la de una quemadura que afecta al 60 por ciento del área de la piel en un ser humano. Estos sucesos no son objeto de interés principal en sí mismos; no tenemos información detallada de las fechas y de las consecuencias de su aparición. Lo interesante para un estudio geofisiológico es el proceso de recuperación del sistema de estas agresiones.

Estamos razonablemente seguros de que ninguno de ellos acabó con Gaia, de manera que una Gaia nueva hubiese tenido que renacer de las ruinas. La capacidad de recuperación tras perturbaciones grandes es una prueba de la salud de los sistemas geofisiológicos.

El hecho de que la vida haya persistido y se haya recuperado de tantas de estas catástrofes proporciona todavía más evidencia de la existencia de un sistema homeostático poderoso en la Tierra.

A principios del Proterozoico el Sol estaba más frío. El problema que tuvo que afrontar Gaia fue el de evitar la congelación de la Tierra por el colapso del dióxido de carbono. Sin la tendencia al enfriamiento causada por la vida la Tierra sería desapaciblemente caliente hoy día. Se diría que en el momento presente la vida está manteniendo la Tierra fría por bombeo y eliminación de dióxido de carbono. Durante los tiempos intermedios del Proterozoico, hace unos 1,5 eones, la radiación solar era justo la precisa para la vida y no hacía falta ningún esfuerzo importante para la termostasis.

Los físicos y los geofisiólogos están completamente de acuerdo en que el dióxido de carbono atmosférico se encontraba a un nivel de alrededor del uno por ciento del volumen.

8°

TIEMPOS MODERNOS

“Nunca me di cuenta de lo sedantes que son los árboles: muchos árboles y claros por donde penetra la luz del Sol, y la serenidad de los árboles. Es casi como estar en otro mundo.” (D.H. Lawrence, Selected Letters)

Este capítulo trata del período de la historia de la Tierra en que organismos vivos suficientemente grandes para ser observados a simple vista crecieron y se movieron en los continentes y en el mar. Los microorganismos todavía florecían y todavía eran responsables de una parte importante de la regulación de la Tierra. Sin embargo, la llegada de grandes comunidades de células de cuerpo blando alteró la superficie de la Tierra y el ritmo de la vida en ella: plantas que podían permanecer de pie sostenidas por estructuras de raíces profundas en el suelo, consumidores que podían trasladarse por el suelo y también por el aire o el mar. Todos estos seres dejaron restos fósiles. Su presencia marca el período denominado Fanerozoico, que abarca desde el Cámbrico, hace unos 600 millones de años, hasta la época actual. Debido a que vivimos en él, y debido a que los registros históricos recientes son mucho más detallados que los del pasado antiguo, parece que se trata de un período familiar y bien conocido. Esto es una ilusión. Sabemos poco de la historia de la Tierra, incluso de la de nuestra propia época. Desde el Cámbrico sólo disponemos de catálogos de especies y rocas. Dan alguna información acerca de la vida en la Tierra pero sólo de manera sucinta, así como una guía de teléfonos informa acerca de las vidas privadas y la economía de una ciudad.

Si consideramos que Gaia es un organismo vivo, el Fanerozoico se puede considerar como el estado más reciente de su vida, en el que

todavía se encuentra. Ello puede ser más fácil que considerar de manera independiente las vidas de los miles de millones de organismos de la que está formada. Conocer un amigo generalmente no requiere un conocimiento detallado de su estructura celular. De manera semejante, la geofisiología, que está interesada en la Tierra en su conjunto, no necesita abrumarse con masas de detalles, como capas gruesas de hojas caídas, entre las ramas del árbol de la ciencia. Echemos un vistazo por tanto a la fisiología de Gaia durante este período. En una historia ideal se debería describir el sistema al completo, pero el hábito de la reducción cala hondo. En el presente estado de ignorancia es mejor dividir el capítulo en secciones, cada una de ellas dedicada principalmente a la regulación de un elemento químico importante y del clima.

Los geólogos indican que la transición del Proterozoico al Fanerozoico ocurrió hace unos 570 millones de años. Los primeros organismos que reconoceríamos como animales con esqueletos aparecieron en la Tierra un poco antes. Como geofisiólogo prefiero contemplar esta transición como marcada también por un cambio en la abundancia de oxígeno, un suceso no muy diferente del que ocurrió entre el Arcaico y el Proterozoico.

Mis colegas me han dejado muy claro que lo que viene a continuación acerca del oxígeno es pura especulación, a menudo, contraria a los criterios convencionales. Lo he incluido aquí a pesar de sus reticencias porque ilustra una hipótesis sobre la evolución del oxígeno libre a la luz de la teoría de Gaia. Si es cierta o errónea no me parece tan importante como su valor para la estimulación de nuevos experimentos y medidas.

Consideremos el oxígeno. Este gas proviene de la utilización de la energía solar por los cloroplastos verdes dentro de las células para convertir dióxido de carbono y agua en oxígeno libre y productos químicos. La mayor parte del oxígeno es usada de nuevo por los consumidores, que comen las plantas y las algas, oxidan el alimento y devuelven el dióxido de carbono al aire y al mar. Desde sus orígenes como productores, los fotosintetizadores han tenido una relación de amor y odio con los consumidores. A los productores no les gusta ser comidos, pero la presencia de los consumidores es

esencial para su salud y la de los organismos mayores de los que forman parte.

Cuando aparecieron los animales y plantas se pusieron de manifiesto los detalles precisos de esta agresión constructiva. Se observa que las plantas poseen venenos y espinas y pinchos, y los animales se ven obligados a desarrollar técnicas nuevas para pastar. Es necesario un equilibrio porque la supervivencia de plantas y algas se vería amenazada sin los consumidores. En la atmósfera sólo hay reserva de dióxido de carbono para unos pocos años. La desaparición de los consumidores de la escena sería desastrosa para las plantas, y en un intervalo de tiempo muy pequeño. No sólo se acabaría el dióxido de carbono para la fotosíntesis, sino que habría cambios climáticos muy importantes a medida que los gases de la atmósfera y el albedo respondiesen a la muerte de las plantas. No menos importante, el intrincado reciclado de nutrientes y la regeneración del suelo desaparecerían. A escala humana, la coexistencia de consumidores y productores se puede comparar con el largo período de paz que ha reinado entre las superpotencias, hostiles pero mutuamente interdependientes.

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

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

Sin embargo, los eucariotas nadadores que aparecieron en el Proterozoico temprano no necesitarían mucho oxígeno, ya que el gas podría difundirse fácilmente a través del pequeño espesor de las paredes de sus microscópicas células; una cantidad tan pequeña como el 0,1 por ciento habría sido suficiente. Los organismos más grandes que aparecieron en el Fanerozoico, tales como los dinosaurios, que estaban formados por volúmenes masivos de células en yuxtaposición, sólo podrían haber existido en un ambiente más rico en oxígeno. Ello es especialmente cierto durante la natación, en que se necesita una gran cantidad de energía. Todavía hoy, con un 21 por ciento de oxígeno en la atmósfera, nuestros músculos no pueden ser alimentados con suficiente oxígeno en condiciones de máximo esfuerzo. Una fuente de energía de reserva, denominada glicolisis, opera cuando corremos lo más rápidamente que podemos. Peter Hochachka, en un curioso libro llamado “Living Without Oxygen” [Vivir sin oxígeno], describe los mecanismos intrincados mediante los que los animales afrontan la producción de energía en un mundo en que para ellos ésta se encuentra limitada por el suministro de oxígeno. Un ejemplo del efecto del tamaño se encuentra en relación con el monóxido de carbono. Para los animales tan grandes como nosotros es fatal. Mata impidiendo que los glóbulos rojos de la sangre puedan transportar oxígeno a nuestros tejidos. Un animal pequeño, el ratón, puede sobrevivir a la saturación completa de su sangre con monóxido de carbono. Sobrevive porque una cantidad suficiente de oxígeno puede difundirse a través de su piel y la superficie de sus pulmones.

Tiene que haber un límite superior para la concentración de oxígeno a la que estos animales pueden vivir debido a los efectos tóxicos de este gas. Estamos tan acostumbrados a pensar en el oxígeno como elemento esencial para la vida que nos olvidamos de sus efectos tóxicos. El metabolismo oxidativo, la extracción de energía del alimento mediante su reacción con el oxígeno, se encuentra inevitablemente acompañado de la fuga de intermediarios altamente venenosos dentro de la célula. Una sustancia como el radical hidroxilo es un oxidante tan superpotente que si se encontrase en la atmósfera en la misma concentración que el oxígeno cualquier cosa

inflamable se quemaría instantáneamente. Reacciona con el metano a temperatura ambiente, mientras que el oxígeno no reacciona más que cerca de los 600 °C. Otros productos indeseables derivados del oxígeno son el peróxido de hidrógeno, el ión superóxido, y los átomos aislados de oxígeno. Las células vivas han desarrollado mecanismos para desintoxicarse de todos estos productos: enzimas, como la catalasa, que descompone el peróxido de hidrógeno en oxígeno y agua, y la superóxido dismutasa, que convierte el maligno ión superóxido en productos inofensivos. Asimismo, antioxidantes, como el tocoferol, eliminan los radicales hidroxilo. Nosotros y los demás animales vivientes de hoy en día, desde el más grande al más pequeño, debemos nuestra supervivencia a este sistema de protección química desarrollado por nuestros antecesores bacterianos. Si no hay un gran exceso de oxígeno se puede contener la toxicidad de estos productos.

¿Por qué aumentó el nivel de oxígeno? Al final del Arcaico, el aporte de especies químicas reductoras --sulfuros e ión ferroso- de la Tierra primitiva fue insuficiente para compensar el flujo de oxígeno proveniente de la deposición de carbono, y el oxígeno aumentó. En el Proterozoico temprano se llegó a un estado estacionario a baja concentración, mucho menor que la de la atmósfera presente. Este nivel provenía de un balance entre las necesidades de los consumidores y la toxicidad del oxígeno para los fotosintetizadores primitivos. No existe una transición tan claramente definida en el Proterozoico como la que corresponde a la aparición del oxígeno hacia el final del Arcaico (ver tabla 6.1). No sabemos por qué empezó a subir de nuevo el nivel de oxígeno, aunque Robert Garrels propone que ello se encuentra asociado con el desarrollo de bacterias que reducen el sulfato. Ello hubiera dado lugar a la deposición de una parte mayor de los materiales producidos por los fotosintetizadores en forma de azufre o sulfuros, dejando detrás un exceso de oxígeno en el aire. Ocurriera lo que ocurriera, las reacciones de este oxígeno libre con otros elementos tales como el carbono y el azufre liberarían ácidos a la atmósfera, lo que aumentaría la erosión de las rocas de la corteza y, consiguientemente, liberaría más nutrientes, lo que daría lugar a una mayor abundancia de organismos

vivientes. Esta retroalimentación positiva sobre el aumento de oxígeno continuaría hasta que las desventajas de su presencia superasen a los efectos beneficiosos. De manera semejante la población de coches en algunas ciudades crece hasta que el movimiento resulta restringido por su presencia.

Tabla 6.1. FUENTES Y SUMIDEROS DE OXIGENO

<i>Periodo</i>	<i>Abundancia</i>	<i>Fuentes</i>	<i>Sumideros</i>	
			<i>Consumidores</i>	<i>Rocas</i>
Arcaico	10^{-7} hasta 10^{-5}	10	1,0	9,0
Proterozoico	0,01 hasta 0,1	30	29,8	0,2
Fanerozoico	0,21	100	99,9	0,1

Nota: Las abundancias de oxígeno se expresan como “porcentajes de mezcla”. Es decir, proporciones en la atmósfera total. Las fuentes y sumideros son las cantidades de oxígeno, en giga toneladas por año, emitidas hacia o consumidas desde la atmósfera. El flujo fotosintético actual es aproximadamente cien cuando se expresa en estas unidades.

En algún momento de este período los organismos empezaron a sintetizar a gran escala los precursores de esas sustancias misteriosas llamadas ligninas y ácidos húmicos. Estas pueden provenir de la invención de algunos antioxidantes nuevos. Los precursores de las ligninas son los fenoles, que son bien conocidos por su rápida reacción con los radicales hidroxilo. Un ejemplo típico de este tipo de sustancias es el coniferol, que cuando reacciona con hidroxilo produce lignina, un polímero carbonoso que tiene una gran estabilidad química y resistencia a la biodegradación. Debido a estas propiedades la lignina daría lugar a un incremento de la tasa de acumulación de carbono si se sintetiza en grandes cantidades, y con ello también aumentaría la tasa de producción de oxígeno.

Desde un punto de vista geofisiológico, la lignina representa un material tan importante para las plantas como lo son los fosfatos y carbonatos para los huesos y conchas de los animales. Del mismo modo que la deposición de la calcita en las células inicialmente puede haber sido un sistema para disminuir la concentración de este elemento tóxico en sus fluidos, la producción de lignina inicialmente puede haber consistido en un método de eliminar la toxicidad del oxígeno. Ambos materiales permiten la construcción de grandes comunidades celulares de una nueva clase. Al principio en los océanos, y ahora en todos los organismos vivientes, las identificamos como plantas y animales. El modelo de la evolución del oxígeno y la regulación del dióxido de carbono representado en la figura 5.4 puede extrapolarse hasta el período actual. Sin embargo este modelo, tal como ha sido descrito, no permite explicar de manera detallada la regulación precisa de la concentración de oxígeno observada durante los últimos centenares de millones de años.

El oxígeno ha permanecido en una concentración constante del 21 por ciento en volumen durante todo el Fanerozoico. La manifestación de la constancia de esta alta concentración se encuentra en las capas sedimentarias que contienen carbón vegetal. Estas se pueden observar en épocas tan remotas como hace 200 millones de años. La presencia de carbón vegetal implica fuego, probablemente incendios forestales. Estos indican límites muy definidos para la cantidad de oxígeno atmosférico. Mi colega Andrew Watson mostró que los incendios no pueden empezar, ni siquiera en zonas secas, cuando el oxígeno se encuentra por debajo del 15 por ciento. Por encima del 25 por ciento los incendios son tan intensos que incluso la madera húmeda de las selvas tropicales se quemaría en una conflagración espantosa. Por debajo del 15 por ciento no podría haber carbón vegetal, por encima del 25 por ciento no podría haber bosques. El oxígeno se encuentra en una concentración del 21 por ciento, cerca del punto medio entre estos límites.

Podría ser que los mismos incendios regulasen el oxígeno. No hay escasez de rayos para dar lugar a su ignición. Si los incendios son los reguladores no puede tratarse de una relación simple. El oxígeno del aire proviene de la acumulación del carbono. Los consu-

midores son eficientes y sólo el 2 por ciento del carbono fotosintetizado alcanza los sedimentos, de donde un 95 por ciento se devuelve al ambiente oxidante en forma de metano. Así, sólo una parte de cada mil del carbono fijado por las plantas queda enterrado en las profundidades. Por otra parte, la combustión es ineficaz. Cualquier fabricante de carbón vegetal nos dirá que el 70 por ciento del carbón de la madera puede quedar preservado en una combustión controlada. Por tanto, los incendios pueden dar lugar a la acumulación de mucho más carbono porque el carbón vegetal es totalmente resistente a la degradación microbiana. Paradójicamente, pues, los incendios pueden dar lugar a una mayor acumulación de carbono a largo plazo. Esta hipótesis preliminar podría dar lugar a que existiera un efecto de retroalimentación positivo para la acumulación de oxígeno, pero éste pronto daría lugar a tal devastación de las selvas que la producción de carbono caería hasta el punto en que el oxígeno se encontraría cerca o por debajo del nivel actual. Entonces se repetiría el ciclo. Ciertamente las capas de carbón vegetal que se encuentran en los sedimentos sugieren la existencia de incendios recurrentes, pero la proporción de carbono acumulado que existe en forma de carbón vegetal es demasiado pequeña como para justificar la existencia de este ciclo.

Una regulación más sutil en relación con el fuego consistiría en la utilización del fuego por algunas especies de árboles como arma para mantener su posesión del territorio. Las coníferas y los eucaliptos han evolucionado independientemente para generar un detritus altamente inflamable en el suelo: montañas de residuos vegetales con resina y terpenos que se incendian y queman ferozmente cuando son encendidos por un rayo. Esta forma de fuego contenido no daña los árboles más altos, pero representa la muerte para algunas especies como los robles. Además estos fuegos dejan poco carbón, la combustión es casi completa. La ecología del fuego es tan evolucionada que algunas especies de coníferas requieren el calor del fuego para liberar las semillas de las cápsulas que las contienen. La precisa regulación del fuego para dar lugar a un nivel de oxígeno tan conveniente como el 21 por ciento sugiere que en ello juegan un papel crucial partes importantes de las plantas, inflama-

bles o no inflamables, que son las víctimas y los beneficiarios del proceso. No es adecuado plantearse si estos árboles que utilizan la ecología del fuego también producen menos lignina que el resto de la vegetación. Si fuera así representarían una fuente menor de carbono sedimentario y así servirían para regular el oxígeno a un nivel en que se producirían incendios pero no tan intensos como para producir más mal que bien.

Esta discusión independiente sobre el oxígeno está justificada por su importancia histórica; es como si el oxígeno hubiese sido el director que guió a los músicos en su orquesta evolutiva. No obstante debemos recordar que en Gaia la evolución de los organismos y su ambiente es un proceso único e inseparable. Además, los ciclos de todos los elementos que constituyen Gaia están estrechamente acoplados entre sí, y con las especies de organismos. Los intentos de descripción del papel de cada una de estas partes del sistema están limitados por la inevitable utilización de la expresión escrita pero son necesarios. Con esta idea en mente, y recordando que la geofisiología del carbono y del oxígeno no pueden separarse, contemplemos ahora el dióxido de carbono.

En los tiempos modernos, el dióxido de carbono es un simple gas traza en la atmósfera que contrasta con su abundancia en los demás planetas terrestres, o con los gases abundantes de la Tierra, oxígeno y nitrógeno. El dióxido de carbono se encuentra ahora a sólo 340 partes por millón en volumen. La Tierra primitiva en que empezó la vida tenía probablemente 1.000 veces más dióxido de carbono. Venus tiene ahora 300.000 veces más e incluso Marte, cuyo dióxido de carbono se encuentra en gran parte congelado en la superficie, tiene 20 veces más. James Walker y sus colegas intentaron explicar el bajo contenido de dióxidos de carbono en la Tierra mediante simples argumentos geoquímicos.

Su modelo se basaba en el hecho de que la única fuente de este gas es la emisión volcánica y que el único sumidero es su reacción con las rocas de silicato cálcico. En su mundo la vida no jugaba un papel en la regulación del dióxido de carbono. A medida que el Sol se calentaba ocurrían dos procesos. El primero era el incremento en la tasa de evaporación de agua de mar y, por tanto, de lluvia. El se-

gundo, un incremento de la tasa de reacción del dióxido de carbono con las rocas. Estos dos procesos actuando de manera conjunta incrementarían la tasa de erosión de las rocas y así disminuiría el dióxido de carbono. El efecto neto consistiría en una retroalimentación negativa en el aumento de la temperatura en la medida que aumentase el calor procedente del Sol. Por desgracia este modelo plausible e imaginativo no podía explicar los hechos. El dióxido de carbono predecido para la época presente sería 100 veces superior al que en realidad es.

El modelo de James Walker puede ser factible si se incluyen en él los organismos vivientes. En cualquier punto de la Tierra en que se examine el suelo de una región bien cubierta por la vegetación, el contenido en dióxido de carbono es del orden de 10 a 40 veces superior al que se encuentra en la atmósfera. Lo que ocurre es que los organismos vivientes actúan como una bomba gigante. Continuamente apartan el dióxido de carbono del aire y lo conducen a las partes profundas del suelo donde puede reaccionar con las partículas de las rocas y ser eliminado. Consideremos un árbol. Durante su vida deposita en sus raíces toneladas de carbono que recoge del aire; una parte del dióxido de carbono escapa de nuevo a la atmósfera debido a la respiración de las raíces, y cuando el árbol muere el carbono de las raíces es oxidado por los consumidores, devolviendo a la atmósfera el dióxido de carbono que se encontraba en las profundidades del suelo.

De un modo u otro los organismos del suelo se encuentran insertos en el proceso de bombeo de dióxido de carbono desde el aire al suelo. En éste entra en contacto con las rocas de silicato cálcico y reacciona con las mismas para formar carbonato cálcico y ácido silícico. Estos productos a su vez se disuelven en el agua subterránea y entran a formar parte de las corrientes y los ríos, incorporándose al mar.

En el mar, los organismos marinos continúan el proceso de incorporación a los sedimentos secuestrando el ácido silícico y el bicarbonato cálcico para formar sus conchas. Como consecuencia de la continua lluvia de conchas microscópicas marinas, los productos de la erosión de las rocas -caliza sedimentaria y sílice- son enterrados

en el fondo del mar y eventualmente incorporados al magma por el movimiento tectónico de placas. Si la vida no estuviera presente el dióxido de carbono de la atmósfera tendría que interaccionar con el silicato cálcico de las rocas mediante procesos inorgánicos lentos como la difusión. En estas condiciones, para mantener en el suelo la cantidad de dióxido de carbono que ahora se observa, la concentración de este gas tendría que ser mucho mayor, quizá del orden del 3 por ciento. Esta es la razón por la cual el modelo de Walker no funciona.

Si se considera desde este punto de vista, ya tenemos una explicación de la baja concentración de dióxido de carbono en la atmósfera actual de la Tierra. Este gran mecanismo geofisiológico ha funcionado desde que empezó la vida como una parte de la regulación climática. Sin embargo, a medida que el Sol se torna más caliente, este mecanismo tiene pocas posibilidades de mantener el planeta frío. Hay una relación inversa entre la abundancia de dióxido de carbono y la abundancia de vegetación. Si asumimos que la salud de Gaia se mide por la abundancia de vida, los períodos de salud serán los de bajo nivel de dióxido de carbono. Durante el estado de salud habitual de Gaia, en el frío confortable de la glaciación, el dióxido de carbono se encuentra a sólo 180 partes por millón en volumen -peligrosamente cercano al límite inferior necesario para el crecimiento de las plantas.

No es sorprendente que en el Mioceno, hace unos 10 millones de años, se desarrollase un tipo nuevo de planta capaz de crecer a concentraciones de dióxido de carbono más bajas. Estas plantas tienen una bioquímica diferente y se llaman plantas C4 para distinguirlas de las plantas predominantes C3. Los nombres C3 y C4 se refieren a una diferencia en el metabolismo de los compuestos de carbono en estos dos tipos de plantas: las plantas C4 son capaces de fotosintetizar a niveles de dióxido de carbono mucho más bajos que las antiguas plantas C3. Las modernas plantas C4 comprenden fundamentalmente las hierbas, aunque no todas, mientras que los árboles y las plantas de hoja grande usualmente utilizan el ciclo C3. Eventualmente, y probablemente pronto, estas plantas nuevas sustituirán a las anteriores y serán capaces de desarrollarse incluso a concen-

traciones más bajas de dióxido de carbono para compensar el calor creciente del Sol. Sin embargo, ello será una solución temporal, porque si asumimos que la situación actual se mantendrá en el futuro, en un tiempo tan corto como dentro de 100 millones de años, el Sol se habrá calentado lo suficiente como para que la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera tenga que ser nula para mantener la temperatura media actual. En breve se explicará que hay otros mecanismos de enfriamiento que pueden intervenir. También podría suceder que evolucionara un ecosistema que se encontrase cómodo a una temperatura media de hasta 40 °C.

La crisis del dióxido de carbono es importante pero no necesariamente tiene que amenazar la vida de Gaia.

Si estoy en lo cierto en cuanto a que la época glacial es el estado preferido de Gaia, entonces los períodos interglaciares como el presente representan un fallo temporal de regulación, un estado de febrícula planetario del ecosistema reciente. ¿Cómo se ha llegado a él?

Es conocido que los sistemas activos de regulación o control exhiben inestabilidades cuando llegan al límite de su rango operacional. Ello se puede ver claramente en el modelo del mundo de las margaritas de la figura 3.6. Cuando la estrella que calienta el planeta imaginario se vuelve más caliente, los efectos de la plaga cíclica que afecta a las plantas aparecen en una forma amplificada, en forma de fluctuaciones cíclicas de temperatura, hasta que el sistema fracasa por sobrecalentamiento.

Todavía no conocemos la causa de las glaciaciones, aunque sabemos que se trata de un fenómeno periódico que ocurre sincronizadamente con pequeñas oscilaciones en la cantidad de radiación solar que llega a la Tierra y con las variaciones a largo plazo de la inclinación y la órbita de la Tierra. Esta relación astrofísica entre glaciación y órbita e inclinación de la Tierra fue propuesta por un yugoslavo, Milutin Milankovich. El incremento del calor recibido por el Sol no es en sí mismo suficiente para explicar el intervalo de temperatura entre períodos glaciares e interglaciares, pero podría constituir el inductor que sincronizase el cambio de un estado al

otro. De acuerdo con el físico japonés Shigeru Moriyama, el análisis matemático de la periodicidad de la temperatura media en la Tierra en el último millón de años es más coherente con una oscilación inducida externamente que con una oscilación autónoma, o una respuesta simple a los cambios de energía radiante del Sol.

La geofisiología sugiere que, para regular el clima frente a un incremento creciente en el calor del Sol, los glaciares son el estado normal y los interglaciares, como el presente, los patológicos. Si pensamos de esta manera, la baja cantidad de dióxido de carbono en las épocas glaciares puede corresponder a un biota más eficiente. Tienen que haber existido más organismos en la Tierra. En caso contrario, ¿cómo es posible que la cantidad de dióxido de carbono haya sido tan baja? Si había más organismos bombeando ¿dónde están? A primera vista parecería que las capas de hielo dejarían menos sitio para la vida ya que cubrirían una buena parte de lo que es ahora, o lo era antes de que aparecieran los seres humanos, tierra forestal. Sin embargo, a medida que el agua entraba a formar parte de los glaciares terrestres, el nivel del mar habría bajado unos 100 metros, dejando expuestas al aire vastas áreas de suelo rico y fértil de las plataformas continentales. Un vistazo al mapa de las plataformas continentales muestra que una gran parte de la nueva tierra se encontraría en los trópicos húmedos, como las zonas actuales del sudeste de Asia. Ello habría representado un área equivalente a la superficie del África actual, y habría podido mantener selvas tropicales.

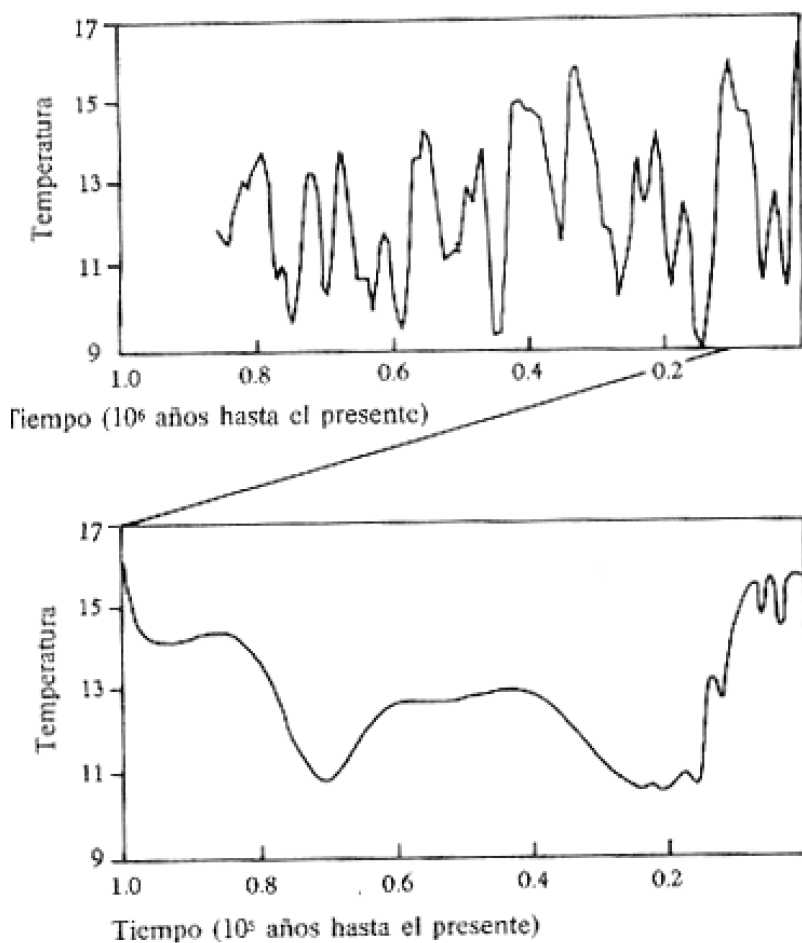
Un mundo semejante es inherentemente inestable. Si una tendencia al calentamiento, como el efecto Milankovich, diera lugar a una disminución de zonas terrestres, el efecto combinado del incremento del dióxido de carbono junto con el efecto geofísico retroactivo de una disminución en el área de reflexión constituida por la cubierta de hielo y de nieve daría lugar a un incremento acelerado de la temperatura y del dióxido de carbono. El sistema también sería inestable desde un punto de vista biológico. En una situación cercana al límite inferior del dióxido de carbono necesario para el mantenimiento de la fotosíntesis habría una intensa presión selecti-

va sobre las plantas emergentes para que pudieran vivir con menos dióxido de carbono aún.

También hay otros factores críticos que podrían precipitar un aumento de dióxido de carbono y temperatura. Uno de los que se me ocurren consiste en algún efecto relacionado con el incremento de sal en el océano a medida que el agua se congelase para formar hielo. La lluvia ácida emitida por las algas marinas como resultado del exceso de salinidad, o bien un fallo en la producción de sulfuros volátiles por el biota marino, que podría dar lugar a una disminución de plantas terrestres privándolas de un elemento esencial, podría ser otro. Una disminución de la cubierta de nubes y del albedo planetario es otro. Los ciclos de las edades de los hielos son conocidos. En la figura 6.1 se muestra la historia de la temperatura durante el último millón de años.

También debemos tener en cuenta los procesos regionales que se pueden oponer a la tendencia general hacia el enfriamiento. En las zonas templadas del norte, los grandes bosques de coníferas son de color oscuro y se sacuden fácilmente la nieve blanca que cae encima de ellos durante el invierno. La duración de la estación de invierno debe encontrarse reducida de manera considerable gracias a su presencia. El último sol de invierno en latitudes continentales más allá de los 50 ° no es suficientemente potente para fundir nieve fresca, cuya blancura refleja la energía radiante hacia el cielo. Los pinos negros absorben la luz del Sol, calentándose no sólo los árboles sino también la zona. Una vez que la nieve se ha fundido incluso el suelo desnudo puede absorber luz solar, haciéndose suficientemente templado como para que germinen las semillas y permitiendo que comience la primavera.

La circularidad de las descripciones de los sistemas de control fisiológico dificultan la elección de un punto de partida.



Evolución de la temperatura durante las series recientes de glaciaciones. (A partir de S. W. Matthews.)

¿Qué fue primero, el nivel bajo de dióxido de carbono y la cubierta de nubes densa o la baja temperatura? Esta pregunta, como la de la prioridad del huevo o la gallina, carece seguramente de sentido. Pensemos en el caso de un desarrollo evolutivo reciente, la aparición de plantas C4 que son capaces de crecer a concentraciones

más bajas de dióxido de carbono que las antiguas plantas C3. Estas plantas C4 podrían representar el resultado de las glaciaciones y la inducción de más períodos glaciales. Ahora hay suficiente dióxido de carbono para todas las plantas por lo que no hay mucha competencia entre plantas C3 y C4 para ocupar los hábitats, excepto por lo que respecta a la intervención humana que, con finalidades agrícolas, elimina las plantas C3 primitivas y las reemplaza por trigo, arroz, bambú, caña de azúcar, etcétera, muchas de las cuales son plantas C4. Durante una glaciación, cuando el dióxido de carbono está cerca del límite tolerable para las plantas C3, las ventajas del metabolismo C4 empiezan a desplazar la balanza a su favor.

La afición humana por la interferencia me llevó a incluir una trágica historia ficticia en mi primer libro de Gaia. El personaje principal era un biólogo agrícola juicioso y bien intencionado, el doctor Intensli Eeger. Tuvo éxito en donde otros acontecimientos fortuitos han fallado: en eliminar todo ser viviente mediante un proceso autoinducido. Desarrolló, por medio de la ingeniería genética, un microorganismo fijador de nitrógeno y fósforo. La idea era intentar la mejora del rendimiento del arroz en los trópicos húmedos, de manera que al final se venciera el hambre en el Tercer Mundo. Por desgracia su organismo encontró un alga unicelular planctónica mucho más de su agrado que las plantas arroceras. Dicha combinación tuvo tanto éxito que conquistó el mundo. Fue una victoria pírrica porque el mundo binario de la combinación alga-bacteria no pudo mantener la homeostasis planetaria por sí mismo.

Me he sentido un poco culpable por adscribir, incluso a un personaje ficticio, un castigo tan terrible por entrometido y parece justo darle una segunda oportunidad. Esta vez dicho personaje utiliza su ingenio impresionante para desarrollar una nueva forma de árbol a partir de avenas salvajes, uno que funcionaría mediante el ciclo C4 y crecería vigorosamente en las selvas tropicales. Produciría un fruto delicioso lleno de vitaminas y nutrientes, y tendría una gran habilidad para crear bien en áreas áridas. Sus plantaciones podrían invertir los procesos de desertización.

La sustitución de una gran cantidad de selvas tropicales por *Avena eegeriensis* dio al principio la impresión de que los días malos de la

degradación ambiental ya habían pasado. Por todas partes se desarrollaban plantaciones lustrosas, reverdeciendo el Sahel y devolviendo la lluvia a regiones que habían permanecido desérticas durante miles de años. Bajo la sombra de los nuevos árboles volvió a desarrollarse el complejo ecosistema tropical. Pronto se vio que el problema del efecto invernadero asociado al dióxido de carbono desaparecería; el crecimiento lustroso de los árboles había incrementado tanto la tasa de absorción de dióxido de carbono por el suelo que el sumidero era ahora más grande que la fuente. Sin embargo, algunos científicos comentaron que la cubierta de nubes y por tanto el albedo habían aumentado. Existía un debate científico muy vivo: En línea con el pensamiento de moda, y animados por el aporte generoso de fondos de investigación, los científicos atribuían el incremento de la nubosidad a las actividades de la industria química y nuclear.

Pronto empezó el alargamiento del período de nieve invernal en Moscú, Boston, Chicago, Bonn y Pekín hasta mayo. Más al norte había nieve perpetua. Se cerraron las plantas de energía nuclear y las industrias de clorofluorohidrocarburos. Sin embargo, mucho antes de que las grandes poblaciones humanas del hemisferio norte pudieran darse cuenta, el mundo se introdujo en la próxima y más grande glaciación. Gaia volvió a respirar de nuevo, fría y acomodada a un contenido total de dióxido de carbono de 100 partes por millón. No mucho más tarde, en términos gaianos, los océanos comenzaron a retroceder en las vastas áreas de la plataforma continental: Australia, Papúa y Nueva Guinea estuvieron otra vez juntas de nuevo por tierra cubierta de una selva lujuriosa. Las tierras y las ciudades de las potencias de antaño fueron enterradas casi completamente por los glaciares. Las plantas C4, con la ayuda de la humanidad, se convirtieron en dominantes, y liberaron Gaia para el inicio de otro largo período de homeostasis -una edad de hielo que duraría millones de años, no únicamente centenares de miles.

Esta es una historia improbable, pero que sirve para ilustrar el mecanismo mediante el que puede acaecer un cambio ambiental como resultado de un cambio en especies dominantes. Nosotros podemos ser la forma superior de vida animal, pero no hay duda de que los

árboles son la forma superior de vida vegetal. Un árbol C4 plenamente desarrollado puede constituir una competencia formidable para las selvas tropicales que ahora conocemos. El doctor Eeger se habría redimido a sí mismo y habría dejado al hombre de nuevo en una existencia coherente con Gaia.

En un organismo vivo se utiliza ampliamente el azufre tanto de forma estructural como funcional. Por tanto, a continuación me gustaría explicar de qué manera la información recogida en la década de los setenta ha aumentado nuestra comprensión del papel fisiológico del azufre en Gaia.

En el verano de 1971 participé en la Gordon Conference que tuvo lugar en New Hampton School, en la ciudad del mismo nombre del estado de New Hampshire. El tema de la reunión era «Ciencia Ambiental: Aire», y el presidente James Lodge, un químico atmosférico amigo mío. Puede decirse que gracias a su capacidad de organización esta reunión marcó el inicio de un nuevo y profundo interés en la atmósfera que ha continuado hasta el momento presente.

Fue allí donde presenté por primera vez las medidas de halohidrocarburos y gases sulfurados en el aire. También fue allí donde aprendí que el punto de vista convencional acerca del ciclo natural del azufre requería la emisión desde los océanos de grandes cantidades de sulfuro de hidrógeno para compensar las pérdidas de azufre, en forma de ión sulfato, generadas por el lavado de los ríos. Sin ningún tipo de retorno de azufre, los organismos terrestres pronto habrían agotado este elemento esencial. Allí conocí el trabajo realizado por el profesor Frederick Challenger de la Universidad de Leeds en los años cincuenta, mostrando que muchos organismos marinos emiten azufre en forma de un compuesto gaseoso, el sulfuro de dimetilo. También sabía, como químico, que el sulfuro de hidrógeno se oxida rápidamente en agua que contenga oxígeno disuelto, y que huele mal. Con estos antecedentes me pareció que no podía haber otra forma química más importante que el sulfuro de dimetilo para el transporte de azufre del océano a la tierra. Por otra parte, este olor elusivo del mar es muy parecido a una forma diluida de sulfuro de dimetilo. Ciertamente, una vez que alguien ha oído este gas, de olor agradable en concentraciones diluidas, se puede

reconocer incluso como un componente importante del aroma del pescado fresco recién extraído del mar. Por el contrario no forma parte del olor del pescado fresco de agua dulce.

Cuando volví a casa, en Inglaterra, pensé que podía ser una buena idea ir en barco desde el hemisferio norte al hemisferio sur midiendo los gases sulfurosos en el aire y en el mar con la intención de descubrir si el sulfuro de dimetilo era realmente el compuesto responsable del transporte de azufre en el mundo real. También quería aprovechar la oportunidad para medir los gases halocarbonados, como los que se utilizan en los aerosoles, con la esperanza de que éstos «marcasen» de forma efectiva el aire y nos permitieran observar su movimiento sobre los océanos. Esta fue la última ocasión en que solicité fondos de investigación a través del sistema regular de escritura de un proyecto y remisión a una agencia de subvención científica. Solicité una cantidad pequeña, no más de unos pocos cientos de libras, para fabricar un aparato y llevarlo en el barco desde el hemisferio norte al sur, midiendo los gases cada día de navegación. Lo tendría que haber sabido de antemano. Ambos proyectos fueron rechazados. A los supervisores les pareció sin sentido buscar sulfuro de dimetilo cuando era conocido que el flujo de azufre perdido correspondía al transporte de sulfuro de hidrógeno. El segundo proyecto, la búsqueda de halohidrocarburos, fue rechazado por frívolo, porque era «obvio» que no existía ningún aparato suficientemente sensible para medir las pocas partes por trillón de clorofluorohidrocarburo que yo proponía buscar.

Fui afortunado en ser independiente. Todo lo que me hizo falta para la aprobación del viaje fue un acuerdo con mi esposa Helen, cuyos fondos para el mantenimiento de la casa se verían disminuidos por el coste de la investigación. Ella no compartía las opiniones de mis supervisores. Fabriqué un cromatógrafo de gases simple (que se muestra en la figura 6.2) cuyo coste total no podía ser más que de unos centenares de libras. Algunos funcionarios amables del Consejo de Investigación para el Medio Ambiente Natural (Natural Environment Research Council), que discrepaban de la opinión del cuadro de asesores científicos, me pagaron los gastos de viaje y subsistencia a partir de un fondo discrecional. Viajé con un barco

de investigación, el RV Schackleton, en su trayecto desde Gales a la Antártida y viceversa. Volví desde Montevideo, después de permanecer tres semanas en el barco -por desgracia éste era todo el tiempo que pude pagar-, pero un colega científico, Roger Wade, continuó amablemente las medidas cuando el barco se encontraba en la Antártida. Mi colega Robert Maggs voló a Montevideo en la primavera de 1972 para completar el viaje a casa a través del Ecuador hasta las islas Británicas. Las medidas realizadas en este viaje fueron dadas a conocer en tres pequeños trabajos publicados en la revista Nature. El primero describió las medidas de halohidrocarburos, mostrando que los clorofluorohidrocarburos eran compuestos persistentes y de larga vida en la atmósfera terrestre, y que otros dos gases halocarbonados, el tetracloruro de carbono y el ioduro de metilo, se encontraban por todas partes. Estos descubrimientos dieron lugar, entre otras cosas, a la «guerra del ozono», y al desembolso de un océano de fondos de investigación, por recomendación de los mismos comités que habían rechazado las primeras solicitudes. Las especulaciones acerca de la “amenaza al frágil escudo de la Tierra”, la capa de ozono, fueron más plausibles que la idea de un viaje de investigación estimulado por la mera curiosidad de un científico individual.

Los trabajos segundo y tercero sobre los gases sulfurados mostraron la presencia ubicua de sulfuro de dimetilo y de sulfuro de carbono en los océanos. Excepto en lo que respecta a los primeros cálculos de los flujos de Peter Liss, de la Universidad de East Anglia, estos resultados fueron ignorados durante mucho tiempo hasta que M.O. Andreae mostró, mediante sus medidas cuidadosas y extensivas de los gases sulfurados oceánicos a principios de los ochenta, que las emisiones de sulfuro de dimetilo desde el océano eran ciertamente suficientes como para justificar su papel como el mayor agente transportador de azufre del mar a tierra.

El sulfuro de dimetilo no hubiera sido investigado como posible candidato a transportador químico si no hubiera sido por el estímulo de la teoría de Gaia, que requiere la existencia de mecanismos geofisiológicos para semejantes transferencias. Así, uno puede pre-

guntarse ¿de qué tipo de mecanismo se trataría? ¿Por qué las algas marinas que se encuentran en medio del océano se deberían preocupar lo más mínimo por la salud y el bienestar de los árboles, jirafas y seres humanos de las superficies terrestres? ¿Cómo se puede desarrollar un altruismo tan sorprendente mediante la selección natural?

No se conoce todavía la respuesta con detalle, pero tenemos un indicio de cómo puede haber evolucionado a partir de las propiedades de un extraño compuesto llamado propionato de dimetilsulfonio. Esta sustancia es lo que los químicos orgánicos llaman una betaína, a partir del descubrimiento hace muchos años de un compuesto similar, el acetato de trimetilamonio o betaína, que se aisló en primer lugar a partir de los escarabajos. La importancia de las betaínas para la salud de los organismos que viven en ambientes salobres fue descubierta por A. Vairavamurthy y sus colegas. Las betaínas son sales neutras. Transportan sobre la misma molécula una carga positiva, asociada con el azufre o nitrógeno, y una carga negativa, asociada con el ión propionato. En una sal ordinaria, tal como el cloruro sódico, la disolución en agua separa las partículas cargadas, que se convierten en iones independientes que flotan libremente. Como vimos en el capítulo anterior, la vida marina vive cerca del límite tolerable de concentración salina. Las concentraciones de cloruro sódico por encima de 0,8 molar son tóxicas, pero ello no es aplicable a las betaínas. La neutralización interna de sus cargas iónicas las convierte en sales inocuas, y en la célula se comportan como los azúcares, el glicerol y otros solutos neutros. Las células que son capaces de sustituir una gran proporción de sal por betaína se encuentran en una posición ventajosa.

Me pregunto si alguna vez, hace mucho tiempo, había algas marinas que eran abandonadas por la marea en la arena de alguna antigua playa. La luz del Sol las secaría pronto. A medida que el agua se evaporase de sus células, las concentraciones internas de sal aumentarían por encima del límite letal y morirían. A lo largo de la evolución, las algas que contuviesen solutos neutros en sus células resultarían menos dañadas en el proceso de desecación y éstas tenderían a dejar más descendencia. A su vez, la síntesis de las betaínas

nas sería un proceso común entre las algas marinas. El azufre es muy abundante en el mar mientras que el nitrógeno a menudo es escaso. En tierra se encuentra la situación inversa. Ello puede ser la razón por la que el propionato de dimetilsulfonio fue la betaína escogida en lugar de las betaínas de nitrógeno de los escarabajos y otras plantas terrestres. (De manera incidental cabe señalar que los escarabajos también pueden existir en presencia de concentraciones elevadas de sal.) Ello puede no proporcionar una explicación completa de la presencia de propionato de dimetilsulfonio como betaína predominante en las algas, pero no hay duda de que las algas que la contienen constituyen la fuente de sulfuro de dimetilo. Cuando las algas mueren o son ingeridas, la sulfobetaína se descompone fácilmente para dar lugar al ión acrilato y al sulfuro de dimetilo. Las algas que tendieran a quedarse en las zonas superiores y secas de la playa darían por tanto lugar a este gas sulfuroso y las brisas provenientes del mar lo transportarían tierra adentro donde las reacciones atmosféricas lo descompondrían lentamente y depositarían el azufre como sulfato y metanosulfato en el suelo. El azufre es escaso en tierra y esta fuente nueva podría haber propiciado el crecimiento de las plantas terrestres. Este crecimiento incrementado aumentaría la erosión de las rocas y así aumentaría el flujo de nutrientes hacia el océano. No es difícil explicar la extensión mutua de los ecosistemas terrestres a partir del aporte de azufre y de los ecosistemas marinos a partir del incremento del flujo de nutrientes. De este modo, o mediante una serie similar de pasos pequeños, evolucionan los intrincados sistemas de regulación geofisiológica. Esto ocurre sin ninguna planificación o previsión, y sin romper las reglas de la selección natural darwiniana.

Antes de abandonar la playa, por decirlo así, también me he preguntado por la amplia producción de yoduro de metilo de las plantas marinas. Contrariamente al sulfuro de dimetilo este producto es tóxico. Es un mutágeno y un carcinógeno. El primer estímulo para su producción puede haber sido como antibiótico para ayudar a las algas a defenderse, a desanimar a los predadores. La emisión de yoduro de metilo a' aire desde el mar es un mecanismo esencial para el mantenimiento de un aporte continuo de yodo hacia las masas

continentales, un elemento que es vital para los organismos terrestres. Puede valer la pena investigar la posibilidad de que una betaína específica, el propionato de metiliodonio, exista en algas grandes como las algas pardas, que son una fuente importante de yoduro de metilo. Si es así, ello sugerirá una relación común con la historia de la sulfobetaína.

No obstante, hay otros aspectos en relación con los ciclos del azufre y yodo aparte del mero reciclado de los elementos. El geofísico de Alaska, Glen Shaw, ha propuesto una idea estimulante acerca de un sistema de control climático geofísicamente eficiente. Sabiendo que una cantidad pequeña (en términos planetarios) de azufre en la estratosfera podría afectar profundamente al clima, propuso que la emisión de gases sulfurosos por los organismos marinos era el método más eficiente de control climático. Hay un conjunto de datos importantes que sugiere que las mayores erupciones volcánicas suelen ir acompañadas de una caída en la temperatura media de la superficie terrestre. Los gases volcánicos inyectados en la estratosfera por las erupciones comprenden dióxido de azufre y sulfuro de hidrógeno. (La nube volcánica también consiste en un aerosol de material sólido pero éste se deposita pronto.) Los gases sulfurosos que quedan en la estratosfera se oxidan y con el vapor de agua allí presente forman gotas submicroscópicas de ácido sulfúrico. Debido a su pequeño tamaño éstas se depositan lentamente y pueden permanecer en la atmósfera durante varios años. Estas gotas forman una neblina blanca en la estratosfera que devuelve al espacio la luz del Sol que, en caso contrario, calentaría la Tierra. Entre erupción y erupción queda un fondo de gotas de ácido sulfúrico que se forman continuamente a partir de la oxidación de gases emitidos por los seres vivos. Los más importantes de ellos son el sulfuro de carbonilo y el sulfuro de carbono. Estos corresponden a emisiones pequeñas en comparación con el sulfuro de dimetilo pero en la baja atmósfera son oxidados lentamente (el sulfuro de carbonilo de manera especialmente lenta) y permanecen el tiempo suficiente para entrar en la estratosfera y ser oxidados allí. El planteamiento de Glen Shaw consiste en que el sobrecalentamiento global puede ser compensado por la vida marina que, en consecuencia, incrementaría su

emisión de sulfuro de carbonilo y sulfuro de carbono, lo que puede dar lugar a un mayor espesor de la capa de neblina de gotas de ácido sulfúrico de la estratosfera y, por tanto, a un enfriamiento de la Tierra. Ciertamente éste puede ser uno de los mecanismos geofisiológicos posibles de regulación climática. Pero esta idea incitó a mis colegas a pensar qué ocurriría con un uso mucho más importante de los gases sulfurosos con la misma finalidad.

A lo largo de extensivas investigaciones en los océanos del mundo, M.O. Andreae mostró que los organismos marinos emiten vastas cantidades de sulfuro de dimetilo. Estas emisiones son particularmente notorias sobre las áreas «desiertas» del mar abierto que se encuentran lejos de las plataformas continentales. Este descubrimiento llevó a los meteorólogos R. Charlson y Stephen Warren a proponer que la oxidación rápida del sulfuro de dimetilo en el aire sobre el océano podría dar lugar a núcleos necesarios para la condensación de vapor de agua y la formación de nubes. Las microgotas de ácido sulfúrico son ideales para esta finalidad, y sobre los océanos abiertos no existe otra fuente importante de núcleos de condensación a partir de los que se puedan formar nubes. El aerosol de sal marina, que también puede ser considerado un posible nucleador de nubes, es mucho menos eficaz que las microgotas de ácido sulfúrico. Los océanos cubren alrededor de dos tercios de la superficie de la Tierra y su color es azul oscuro. Cualquier cosa que afecte a la cubierta de nubes sobre los océanos puede afectar de forma importante al clima de la Tierra. En una publicación conjunta, hemos dado a conocer cálculos para estimar el efecto que pueden tener estas emisiones de sulfuro de dimetilo naturales. Estos sugieren que son comparables en magnitud con el efecto invernal del dióxido de carbono, aunque en sentido contrario a él.

Hemos mostrado la posibilidad de una relación estrecha entre el crecimiento de algas en la superficie del océano y el clima. Como geofisiólogo también me preguntaría si estos procesos pueden ser también útiles como una parte importante del sistema de regulación climático. Si es así, ¿cómo evolucionó este sistema? Puede ser necesario tener en cuenta el ciclo del iodo porque la oxidación de sulfuro de dimetilo en la atmósfera es catalizada por compuestos de

iodo. La producción de yoduro de metilo por las algas también puede constituir una parte de este sistema de control climático.

Los lugares propuestos para la regulación de la masa de nubes por emisiones de azufre son las áreas desiertas de los océanos tropicales, cerca del 40 por ciento del área de la superficie de la Tierra. Estas regiones son de productividad baja en comparación con las plataformas continentales y las aguas continentales. Casi se encuentran carentes de vida, como los grandes desiertos terrestres que se extienden a 30 ° de latitud norte y sur del ecuador. En tierra, lo que da lugar al desierto es la falta de agua; en el mar es la falta de nutrientes, fundamentalmente nitrógeno. ¿A qué se parecen estos océanos desérticos? Sus aguas son claras y azules y, como los desiertos terrestres, de ninguna manera la vida está ausente. Uno de estos desiertos es el mar de los Sargazos. Recuerdo que cuando era un muchacho leí una historia de aventuras acerca de los peligros afrontados por un velero atrapado en la densa maraña de algas del mar de los Sargazos. Cuando pasé por esta región, en 1973, a bordo del barco alemán Meteor, me sorprendió la diferencia entre la realidad y mis recuerdos de esas historias. Había algas flotantes, pero en tiras finas y bien separadas, y no representaban un impedimento mayor al que correspondería a la artemisa cuando se camina a través del suelo del desierto.

Las algas que se encuentran en la superficie de estos océanos desérticos no producen los precursores de los núcleos de condensación de nubes para beneficio nuestro ni como parte de un gran diseño para mantener frío el planeta. El proceso debe tener sus orígenes en los efectos ambientales locales de la bioquímica algal. Anteriormente he considerado la posibilidad de que la producción de betaína sulfurosa, el propionato de dimetilsulfonio, pueda tener relación con la respuesta celular al estrés salino. Aunque podría haber sido un descubrimiento de las algas marinas que se desecaban en la orilla, los inventos útiles tienden a extenderse.

La concentración de sal en el mar siempre es desapaciblemente alta para los organismos vivos. Para los organismos unicelulares o los pequeños organismos flotantes, incapaces de regular su salinidad interna, la síntesis de las betaínas puede haber consistido en el me-

dio más barato, en términos de energía, de conseguir un medio interno bajo en sal. De nuevo, la elección natural hubiera tenido que ser el propionato de dimetilsulfonio, porque el azufre (en la forma conveniente de ión sulfato) es abundante mientras que el nitrógeno es escaso. El propionato de dimetilsulfonio permanece en las células de las algas durante toda su vida, pero cuando mueren o son ingeridas se dispersa en el océano donde se descompone para dar lugar a sulfuro de dimetilo. Este gas es oxidado rápidamente en el aire por los ubicuos radicales hidroxilo hasta que casi todo él se convierte en ácido sulfúrico y metanosulfúrico. Los vapores de estos ácidos son transportados junto con los movimientos del aire hasta que alcanzan las alturas supersaturadas con vapor de agua, donde actúan como núcleos de condensación de nubes.

La fuga de sulfuro de dimetilo al aire podría reportar beneficios inesperados para las algas. La cubierta adicional de nubes debida a la presencia de núcleos de ácido sulfúrico altera el clima local. Timothy Jickells, . de la Universidad de East Anglia, llamó mi atención sobre el hecho de que la cubierta de nubes sobre el océano aumenta la velocidad del viento y agita la superficie de las aguas, mezclando las aguas profundas ricas en nutrientes con las aguas superficiales de la zona fotosintética. Esta es una efectiva recompensa por la producción de núcleos de condensación de nubes que ha sido confirmada por el trabajo del meteorólogo John Woods.

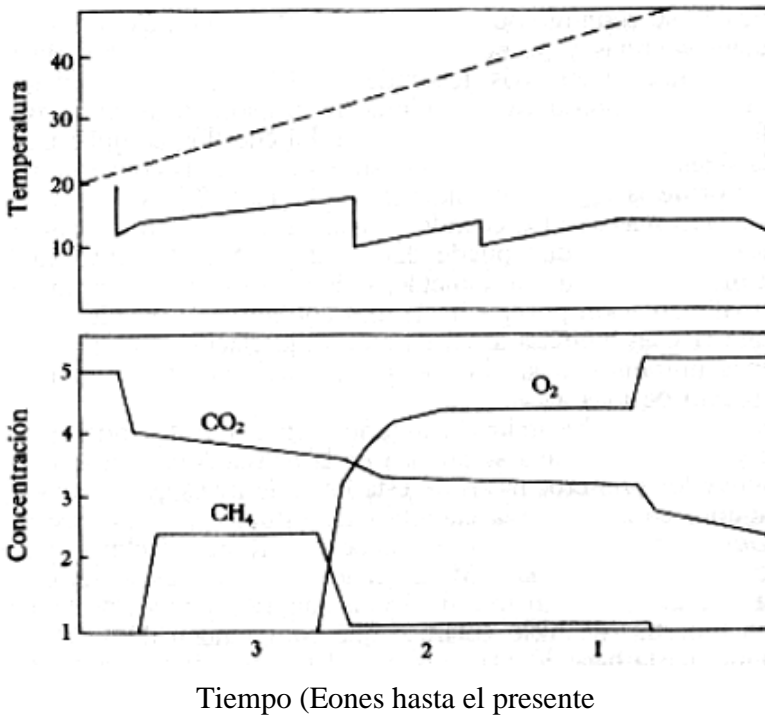
Dudo que el agua dulce de la lluvia ayude mucho a solventar el problema del estrés salino de las algas pero no representa ninguna desventaja. En algunas regiones del mar el aire contiene un aerosol de partículas de polvo de origen continental; se sabe que este polvo viaja miles de kilómetros a través del océano. El profesor J.M. Prospero, un geofísico, ha encontrado regularmente polvo sahariano en el aire que se encuentra sobre las Indias Occidentales. De modo parecido las islas Hawai reciben polvo desde el continente asiático que se encuentra a más de 6.000 kilómetros de distancia. El contenido mineral de este polvo, cuando es arrastrado hacia el mar por la lluvia, también puede ser útil para la nutrición de las algas que se encuentran allí. La superficie de las partículas de polvo no es adecuada para que éstas sirvan como núcleos de condensa-

ción de lluvia, pero son arrastradas hacia el mar por la lluvia inducida por el sulfuro de dimetilo. Finalmente, las nubes que se forman sobre el océano filtran la radiación que llega a la superficie de las aguas y reducen la proporción de radiación ultravioleta. La luz visible necesaria para la fotosíntesis no es un factor limitante en estos ecosistemas oceánicos pobres en nutrientes, por lo que el efecto de sombra de las nubes es irrelevante.

Ninguno de estos efectos es muy importante pero toma dos en su conjunto pueden ser suficientes para mejorar las praderas marinas y permitir que las especies algales que allí se encuentran dejen más descendencia. El sistema geofisiológico requiere la producción continua de propionato de dimetilsulfonio y de las algas que lo fabrican. La cuestión complicada es la siguiente: ¿De qué manera este sistema se ha convertido en factor de la regulación climática de la Tierra? Los océanos se vuelven más salados cuando el agua se congela en los casquetes polares, lo que puede dar lugar a un incremento en la emisión de sulfuro de dimetilo, y de nubosidad, y así a una retroalimentación positiva hacia más enfriamiento. Puede ocurrir que la gran biomasa asociada con las glaciaciones proporcione más nutrientes a la vida oceánica y así permita el mantenimiento de más algas.

Tal como he indicado anteriormente, nuestro primer trabajo sobre este tema se publicó en la revista Nature. Este constituye los primeros pasos de esta línea de investigación que ya apunta como un área científica de estudio muy interesante. Dos grupos de glaciólogos franceses -Robert Delmas y sus colegas, y C. Saigne y M. Legrandhan anunciado recientemente el descubrimiento de ácidos sulfúrico y metanosulfónico en muestras de hielo antártico que comprenden desde el presente hasta hace 30.000 años. Sus datos muestran una correlación inversa muy marcada entre la temperatura global y la inclusión de estos ácidos en el hielo. El ácido sulfúrico tiene diferentes fuentes naturales, pero el ácido metanosulfónico es un producto inequívoco de la oxidación atmosférica del sulfuro de dimetilo. Había de dos a cinco veces más deposición de esta sustancia durante la Edad de Hielo y parece probable que ello era debido a una mayor emisión de los ecosistemas oceánicos. Esto sugiere, si

se confirma, que la cubierta de nubes y la caída en la concentración de dióxido de carbono operarían en sincronía como parte de un proceso geofisiológico para mantener la Tierra fría. Los científicos más conservadores prefieren la explicación geofísica que se deriva de la teoría oceánica del científico W.S. Broecker, quien propuso que las glaciaciones se encuentran asociadas con cambios a gran escala en la circulación del agua de los océanos. Ciertamente, el incremento en el aporte de nutrientes que acompañaría a un suceso semejante podría modificar la productividad biológica y por tanto la tasa de eliminación de dióxido de carbono y la producción de sulfuro de dimetilo. Parece que empieza un debate interesante. Pienso que podría ser útil acabar esta sección con una descripción geofisiológica de la evolución del clima y de la composición química de la atmósfera (ver figura 6.3).



6.3. La visión de un geofisiólogo de la evolución del clima y la composición atmosférica durante el tiempo de vida de Gaia. El

cuadro superior compara las temperaturas probables en ausencia de vida con la constancia escalonada, pero duradera, del clima actual. El cuadro inferior ilustra la caída regular escalonada de dióxido de carbono desde un 10 a 30 por ciento a su presente baja concentración de unas 300 partes por millón. También se muestra el dominio inicial del metano y posteriormente del oxígeno. La escala de cantidades de gas es en partes por millón en volumen y en unidades logarítmicas de modo que 1 equivale a 10 partes por millón y 5 equivale a 100.000 partes por millón.

Esta consiste en una sucesión de largos períodos de homeostasis interrumpidos por grandes saltos. Parece ser que nos aproximamos al final de uno de estos largos períodos de estabilidad. Cuando la vida comenzó, el Sol era menos luminoso y la amenaza era el superenfriamiento. En las edades medias del Proterozoico el Sol brillaba justo lo necesario y fue necesaria poca regulación, pero ahora que aumenta de tamaño y se hace más caliente, su emisión de calor aumenta y se convierte en una amenaza cada vez mayor para la biosfera de la que formamos parte.

GAIA Y EL MEDIO AMBIENTE CONTEMPORANEO

“Un día como hoy comprendí aquello que te he contado un centenar de veces, que no hay nada equivocado en el mundo. La equivocación está en nuestra manera de contemplarlo.”

(Henry Miller)

Un camino agreste y pedregoso transcurre a través de la hierba fina del marjal y luego cae dentro del lecho pelado repleto de piedras del río Lydd. Frente a él se levanta la pequeña montaña de Widgery Tor, una especie de torrecita en las paredes de Dartmoor, aquel macizo cuadrado en forma de castillo. En los días claros y soleados este paisaje ofrecía una amplia y romántica perspectiva que compensaba el pequeño esfuerzo de un paseo por el campo.

El segundo día de agosto de 1982 también era un día soleado, pero la visión del marjal se había perdido en una neblina marrón, densa y sucia. El aire estaba corrompido por los humos de los omnipresentes millones de coches y camiones. Sus gases flatulentos eran transportados por el viento del este proveniente del continente; la química ineluctable empujada por la luz del Sol transformó los humos en un brebaje de brujas que marchitó las hojas verdes. Incluso mis ojos, a pesar de ser lavados por el flujo de lágrimas, empezaban a escocer; mi incomodidad personal pronto atrajo mi atención hacia la observación de la máscara de smog fotoquímico que oscurecía el brillo iluminado del paisaje del campo en el oeste. Un visitante de Los Ángeles instantáneamente hubiera reconocido de qué se trataba, pero los europeos; que todavía se encontraban en su

últimas etapas de luna de miel con el transporte personal, no podían admitir que sus queridos coches despedían algo tan sucio como el smog.

Esta visión de un fastidioso día de verano de alguna manera delimita el conflicto entre las buenas y blandas intenciones de los sueños humanistas y las terribles consecuencias de su realización incompleta. Dejamos que cada familia sea libre de conducir por el campo de modo que pueda disfrutar del aire fresco y de la belleza del paisaje; pero cuando lo hacen, todo se desvanece dentro de la sucia neblina que ocasiona su presencia colectiva motorizada. Cuando subí a la Tor y tuve estos pensamientos también me di cuenta de que al conducir hasta el pie de la colina para empezar el paseo había añadido una cantidad pequeña, pero culpable, de hidrocarburos y de óxidos de azufre y nitrógeno al aire contaminado. También me percaté de que mi desagrado por este tipo de contaminación atmosférica obedecía a un juicio de valor, que además era minoritario.

Son muy pocos los que de una manera u otra no contribuyen a la demolición incesante del medio natural. Típicamente, arrogantemente, nos quejamos de la tecnología en lugar de quejarnos de nosotros mismos. Somos culpables, pero ¿cuál es el delito? Muchas veces en la historia de la Tierra han aparecido nuevas especies con alguna capacidad poderosa de cambiar el medio ambiente y han hecho cosas parecidas, y aun más importantes. Aquellas bacterias simples que utilizaron por primera vez la luz del Sol para vivir y emitir oxígeno fueron los antecedentes de los árboles de hoy en día. Sin embargo, por el sólo hecho de vivir y de llevar a cabo su transformación fotoquímica, alteraron el medio ambiente de manera tan profunda que grandes cantidades de sus especies vecinas fueron destruidas por el oxígeno venenoso que se acumuló en el aire. Otros microorganismos simples han actuado en sus comunidades de manera que se han formado cadenas de montañas y continentes que se han puesto en movimiento sobre la superficie de la Tierra.

Contemplado desde la escala de tiempo de nuestras breves vidas, el cambio ambiental puede parecer fortuito, incluso maligno. Desde el punto de vista del tiempo gaiano la polución del medio ambiente se caracteriza por períodos de estabilidad interrumpidos por inespera-

dos cambios abruptos. El medio ambiente nunca ha sido tan inhóspito como para amenazar la existencia de la vida en la Tierra, pero durante estos cambios bruscos las especies residentes sufrieron catástrofes cuya escala puede haber sido tan enorme que puede haber hecho que algo como una guerra nuclear total se parezca a una brisa dentro de un huracán. Nosotros mismos somos un producto de esta catástrofe. ¿Es posible que inadvertidamente estemos precipitando otra interrupción que altere el medio ambiente que van a heredar nuestros sucesores?

En 1984 se reunieron un grupo de científicos de todo el mundo en Sao José dos Campos en Brasil. El encuentro se celebró bajo los auspicios de la Universidad de las Naciones Unidas y se planteaba la siguiente pregunta: ¿De qué modo la intervención humana sobre los ecosistemas naturales de los trópicos puede afectar a las selvas, las regiones a su alrededor y al mundo entero? Pronto se puso en evidencia que los especialistas, cualquiera que fuese su especialidad, tenían poco que ofrecer aparte de una manifestación clara y franca de ignorancia. Pregunté: «¿Cuándo conoceremos los efectos de la eliminación de las selvas de la Amazonia?»; sólo pudieron contestar: «No antes de que las selvas hayan desaparecido». Parecía como si estuviéramos en una etapa de comprensión de la salud de Gaia análoga a la de un médico antes de que existiese la medicina.

En *The Youngest Science* [La ciencia más joven], Lewis Thomas nos comparó con un joven aprendiz de médico cuyas primeras experiencias se llevaron a cabo en los años treinta. Incluso para aquellos que entonces sabían medicina era sorprendente comprobar las pocas cosas que un médico podía curar en un paciente. La práctica de la medicina consistía en la administración de fármacos que proporcionasen un alivio sintomático e intentar asegurar que el ambiente que rodease al paciente fuese el más favorable posible para los potentes procesos naturales de autocuración que todos poseemos.

Al principio de este libro, se comentó que la ciencia médica se desarrolló como resultado de la observación sutil y por ensayo y error. El descubrimiento del valor curativo de fármacos como la

quinina, o de esta panacea maravillosa contra el dolor y la incomodidad, el opio, no provino de ningún laboratorio brillantemente agudo. Por el contrario, fueron los experimentos iniciales o las observaciones de un genio pueblerino los que revelaron los beneficios que se obtenían al mascar aquella corteza amarga del árbol de la quina o el alivio real que se encontraba implícito en el látex seco proveniente de las cabezas de adormidera: La fisiología, la ciencia de los sistemas de la gente y los animales, era al principio una amalgama de conocimientos indefinidos que posteriormente experimentó un progreso adicional. El descubrimiento de Paracelso de que «el veneno es la dosis» es un invento geofisiológico que todavía tiene que ser descubierto por los que buscan el objetivo inalcanzable y absurdo de contaminación nula. El descubrimiento por William Harvey de la circulación de la sangre añadió una cantidad considerable de conocimiento a la medicina, de manera semejante a como el descubrimiento de la meteorología permitió incrementar de manera importante nuestro grado de comprensión de la Tierra.

Las ciencias especializadas como la bioquímica y la microbiología se desarrollaron mucho más tarde, y transcurrió mucho tiempo hasta que sus nuevas contribuciones permitieron mejorar la práctica de la medicina. Tal como dije anteriormente, por los años en que redactaba este libro, apareció en la revista *Nature* un trabajo que describía la estructura molecular del virus responsable del síndrome de inmunodeficiencia adquirida, pero transcurrirá mucho tiempo antes de que este logro impresionante de la bioquímica pueda rescatar a quienes ahora mueren de SIDA y consuele a aquellos que temen esta mortal y extraña enfermedad.

Parecía particularmente apropiado encontrarse en Brasil como si se tratase de galenos al viejo estilo intercambiando opiniones junto a la cama de un paciente con una enfermedad incurable. Nos dimos cuenta de nuestro inadecuado nivel de conocimientos y de la necesidad de una profesión nueva: la medicina planetaria, una clínica general para la diagnosis y tratamiento de enfermedades planetarias. Pensamos que se desarrollaría a partir de la experiencia y el empirismo, tal como lo ha hecho la medicina. También nos pareció a algunos que la geofisiología, la ciencia de los sistemas de la Tie-

rra, puede servir, tal como lo hizo la fisiología en la evolución de la medicina, como guía científica para el desarrollo de esta profesión putativa.

Por tanto este capítulo consistirá en una descripción de los problemas reales e imaginarios de Gaia a través de los ojos de un practicante contemporáneo de la medicina planetaria. Los conocimientos científicos de referencia, la geofisiología, ya han sido desarrollados en los capítulos precedentes. Consideraremos los indicios físicos, la sintomatología clínica, característica para ver si se puede realizar algún diagnóstico. En el caso de Gaia hay que decir que las quejas no vienen del paciente, sino de las moscas inteligentes que lo infestan. Sin embargo, no hay nada que nos impida realizar un examen rutinario de los registros de temperatura y de los análisis bioquímicos de los fluidos corporales.

La fiebre del dióxido de carbono

«El dióxido de carbono es un gas incoloro con un olor débilmente acre y gusto ácido. Se encuentra de forma natural en la atmósfera de la Tierra, sirve como un elemento esencial en la nutrición de las plantas y es un elemento que determina de forma importante el balance térmico del planeta. Las actividades humanas liberan dióxido de carbono a la atmósfera a través de la combustión de madera, carbón, petróleo gas natural y otros materiales orgánicos. Debido en parte a estas actividades, la concentración de dióxido de carbono ha crecido alrededor de un 7 por ciento en las últimas dos décadas. Ha habido un gran debate acerca de cómo y cuándo la Tierra reaccionará y qué impacto va a tener esto en la humanidad.»

Así empieza el primer capítulo de ese libro espléndido, Carbon Dioxide Review 1982 [Dióxido de carbono. Resumen 1982], editado por William Clark. Excepto en el caso de que se hayan realizado algunos descubrimientos nuevos e importantes entre el tiempo de su publicación y cuando usted lea estas páginas, sospecho que este libro todavía se encontrará entre las mejores fuentes de información acerca de este tema tan complejo.

Desde los principios de la vida, el dióxido de carbono ha desempeñado un papel contradictorio en la Tierra. Es el alimento para la fotosíntesis y por tanto para toda la vida, el medio mediante el cual la energía de la luz solar se transforma en materia viva. Al mismo tiempo ha servido de manta que ha mantenido la Tierra caliente cuando el Sol era frío, una manta que, ahora que el Sol es caliente, se está haciendo delgada. Sin embargo, hay que tener cuidado porque también es nuestro sustento. Antes hemos visto cómo el biota en todas las partes del mar y de la tierra trabaja para bombear dióxido de carbono del aire de manera que el dióxido de carbono que emerge de los volcanes no nos ahogue. Sin este bombeo constante, este gas aumentaría su concentración en unos centenares de miles de años hasta niveles que harían de la Tierra un sitio tórrido e inhóspito para la mayor parte de la vida actual. El dióxido de carbono es para Gaia como la sal para nosotros. No podemos vivir sin ella pero en exceso es un veneno.

Para los seres humanos, unos cuantos cientos de miles de años es algo casi indistinguible del infinito para Gaia, que tiene alrededor de 3,6 eones, es un tiempo equivalente a tres de nuestros meses. Gaia tiene razones para preocuparse por este descenso a largo plazo del dióxido de carbono. Ahora bien, el incremento de dióxido de carbono como consecuencia de la combustión de productos fósiles solamente es para ella una perturbación menor que dura sólo un instante de tiempo. En cualquier caso ella tiende a compensar la disminución.

Antes de que apartemos a Gaia de nuestras preocupaciones debemos tener en cuenta que, entre las cosas que pueden suceder en un instante, se encuentra el impacto de una bala en pleno vuelo. Por pequeña que sea y por breve que sea el contacto, sus consecuencias pueden ser desastrosas. Así puede ocurrir con Gaia y el dióxido de carbono. La humanidad puede haber elegido un momento muy inconveniente para añadir dióxido de carbono al aire. Creo que el sistema de regulación del dióxido de carbono está cerca del final de su capacidad estabilizadora. El aire de los tiempos recientes ha tenido una concentración inadecuadamente baja en dióxido de carbono para la mayor parte de la vegetación. Tal como se indicaba en el

capítulo anterior, están evolucionando nuevas especies con una bioquímica diferente. Estas especies nuevas, las plantas C4, pueden vivir con niveles muy bajos de dióxido de carbono y dentro de un tiempo puede que reemplacen a los modelos C3 viejos y obsoletos, a medida que este gas prosigue en su paulatina disminución. La progresión no es suave, sino que sigue la marcha renqueante y espasmódica de los viejos. Sabemos que el dióxido de carbono ha disminuido en su concentración a lo largo de la historia de la Tierra, pero subió desde 180 a cerca de 300 partes por millón en unos cientos de años al final de la última glaciación. Una subida rápida como ésta sólo puede haber sido originada por una avería súbita de las bombas. No se puede explicar a partir de los procesos lentos de la geoquímica.

La velocidad y la proporción de la subida del dióxido de carbono que ahora está en curso, como resultado de nuestras actuaciones, es comparable con la del incremento natural que sucedió al final de la última Edad de Hielo. Parece ser que en algún momento del siglo que viene el incremento que causaremos será probablemente igual al causado por el fracaso de las bombas hace 12.000 años. Por tanto, el cambio climático sobre el que tenemos que pensar es posiblemente tan importante como el ocurrido entre la última Edad de Hielo y ahora. Un cambio que transformaría el invierno en primavera, la primavera en verano y el verano en algo habitualmente tan caliente como el verano más caliente del que podamos acordarnos. Para entender la importancia de este cambio a escala personal imaginemos que uno es un ciudadano de una ciudad continental como Chicago o Kíev. El cambio es tan grande como entre el frío más intenso del invierno que ha pasado al fuerte calor del verano que pronto vendrá.

En su libro, William Clark compara las predicciones de los economistas del crecimiento desde ahora hasta mediados de la próxima centuria. Entre ellas se incluye la predicción de Amory y Hunter Lovins que argumentan que el crecimiento podría ser probablemente cercano a cero en el futuro predecible. Esta predicción es muy diferente de la del grande y anticuado Herman Kahn, quien vio el mundo entero del próximo siglo bajo la forma de un desarrollo

suburbano vasto y saludable. Hay una fuerte evidencia objetiva a partir del registro de la producción industrial que indica que la predicción de Lovins está más cercana a la verdad. Desde el año 1974 el ciclo de la energía y materiales de la humanidad se encuentra en un estado estacionario. Incluso en esta situación, a no ser que disminuyamos drásticamente la tasa de combustión de productos fósiles, el dióxido de carbono de la atmósfera continuará aumentando hacia su propio estado estacionario y duplicará su concentración entre los años 2050 y 2100.

Sólo puedo imaginar los detalles que pueden sobrevenir como consecuencia de este calentamiento. ¿Desaparecerán bajo las aguas Boston, Londres, Venecia y los Países Bajos? ¿Se extenderá el Sahara a través del Ecuador? Las respuestas a estas preguntas probablemente provendrán de la experiencia directa. No existen expertos capaces de predecir cual será el futuro clima global.

Tenemos algunos criterios provenientes de la geofisiología, que nos recuerda que la Tierra es un sistema activo y reactivo y no sólo una esfera de roca húmeda y nebulosa. Los sistemas en homeostasis compensan las perturbaciones y trabajan para mantenerse en un estado adecuado. Quizá si la dejásemos a su aire Gaia podría absorber el exceso de calor y dióxido de carbono que le llega. Sin embargo, no se deja a Gaia actuar por sí sola; además de los incrementos de dióxido de carbono también estamos ocupados eliminando una parte de la vida vegetal, las selvas y los bosques, que mediante una respuesta de crecimiento extra podrían contrarrestar el cambio.

Las consecuencias de la distorsión de un sistema que está balanceado precariamente, en los límites de su estabilidad, son probablemente mucho más importantes que los efectos directos y predecibles de la adición de dióxido de carbono a un sistema estable. Tanto la teoría de control como la geofisiología nos indican que la perturbación de un sistema que se encuentra cerca de una inestabilidad puede dar lugar a oscilaciones, cambios caóticos, o colapso. Paradójicamente, un animal que se encuentre a punto de morir de frío, cuya temperatura interna media es de 25 °C, morirá si lo introducimos en un baño caliente. El intento bien intencionado de de-

volverle el calor sólo sirve para calentar la piel hasta el punto que su consumo de oxígeno resulta superior al que pueden proporcionar sus pulmones y el lento latir de su corazón, todavía frío. En estos casos se produce un círculo vicioso de retroalimentación positiva que comienza con la dilatación de los vasos sanguíneos de la piel, lo que reduce la presión sanguínea y la muerte sobreviene rápidamente a partir del fracaso del corazón en hacer circular la sangre que se encuentra demasiado baja en oxígeno para las necesidades del sistema. Un animal hipotérmico se recuperará si se calienta suavemente o si se le proporciona calor internamente, por diatermia.

Sabemos demasiado poco acerca del sistema climático del dióxido de carbono para ser capaces de proporcionar una predicción detallada de las consecuencias del incremento actual. Sin embargo hay una serie de hechos seguros fruto de la observación de los que podemos sacar algunas consecuencias. La temperatura media de la Tierra se encuentra claramente por debajo de la temperatura óptima para la vida vegetal. Hay oscilaciones climáticas periódicas que corresponden a los ciclos de las glaciaciones y los períodos interglaciares y durante las glaciaciones el dióxido de carbono disminuye hasta cerca de su límite inferior posible. Todos estos aspectos son sintomáticos de un sistema en el límite del colapso.

Al igual que nuestro médico de antes, nos encontramos con que el diagnóstico es más fácil que la cura. Quedamos con el desasosiego de pensar que añadir ahora dióxido de carbono a la Tierra podría ser tan imprudente como calentar la superficie de nuestro hipotético paciente hipotérmico. No resulta de mucho alivio pensar que si por descuido precipitamos una interrupción climática la vida continuará en unas nuevas condiciones de estabilidad. Es casi seguro que un nuevo estado estacionario será menos favorable para la humanidad que el que disfrutamos ahora.

Un caso de acidez.

El efecto invernadero del dióxido de carbono no es el único problema que resulta de la combustión de productos fósiles. En las re-

giones templadas del hemisferio norte existe un incremento de la mortalidad y morbilidad de los ecosistemas. Los árboles y la vida de los lagos y ríos se encuentran particularmente afectados. Los síntomas parecen estar relacionados con el incremento de la precipitación de sustancias ácidas. Se dice que la combustión es la causa de la precipitación ácida y de todo el daño que hace a los ecosistemas forestales. ¿La geofisiología da un punto de vista diferente?

Se podría decir que toda la culpa es del oxígeno. Si aquellos dioses paternos, las cianobacterias, no hubieran contaminado la Tierra con este gas nocivo no habría óxidos de nitrógeno ni de azufre que molestasen en el aire, y por tanto no habría lluvia ácida. El oxígeno, el acidificador, la droga gaseosa que tanto nos da vida como nos acaba matando. No fue por un criterio trivial que los químicos franceses del siglo XVIII le llamaron el principio acidificador. En su tiempo no había muchos productos químicos en que experimentar; los que tenían por ejemplo azufre, carbono y fósforo, todos producían ácidos cuando se combinaban con oxígeno: sólo después, cuando el descubrimiento de la electricidad permitió a los químicos aislar elementos como el sodio y el calcio, se encontró que la combustión también produce productos alcalinos. Más tarde aún, se dieron cuenta de que un ácido era una sustancia que daba libremente átomos de hidrógeno cargados positivamente, y se vio que en estos protones se encontraba el verdadero principio de la acidez. Después de eso, el gran químico G.N. Lewis observó que era la carga eléctrica lo que importaba, no el átomo que la acarrea. Mostró que los ácidos pueden ser sustancias que atraen los electrones, los transportadores fundamentales de la carga negativa. En cierto modo el mismo oxígeno es uno de estos ácidos «de Lewis».

No es sorprendente que haya oxígeno libre en el aire como resultado de las transacciones químicas de la vida. El catálogo de elementos presentes en los compuestos químicos de la corteza terrestre tiene más oxígeno que otra cosa; el 49 por ciento de la composición elemental es oxígeno. Tal como observó Lavoisier, entre todos los elementos ligeros fundamentales que constituyen la vida -carbono, nitrógeno, hidrógeno, azufre y fósforo sólo el hidrógeno no da lugar a ácidos cuando se combina con oxígeno. Mucho antes de que

los seres humanos pisasen el planeta la lluvia que caía era ácida. La acidez natural de la lluvia era debida al ácido carbónico, el responsable del suave burbujeo del agua carbonatada, al ácido fórmico, uno de los productos finales de la oxidación del metano, y a los ácidos nítrico, sulfúrico: metanosulfúrico y clorhídrico. Aunque estos cuatro últimos son fuertes y corrosivos la lluvia que caía no causaba daño porque se encontraban muy diluidos. Básicamente estaban producidos a partir de la oxidación de los gases emitidos por los seres vivos; algunos también procedían de los gases que salían de los volcanes o eran formados por procesos de alta energía, como las tormentas eléctricas o los rayos cósmicos que hacen reaccionar al nitrógeno con el oxígeno. Los precursores biológicos de los ácidos, por ejemplo el metano, el óxido nitroso, el sulfuro de dimetilo y el cloruro de metileno son ácidos, pero se oxidan en el aire para dar lugar a la lista de ácidos mencionada anteriormente.

De nuevo, la contaminación por lluvia ácida es un problema de dosis: la polución se produce debido a un incremento hasta niveles intolerables de ácidos que antes estaban a concentración benigna. En este sentido, la destrucción de los ecosistemas por los ácidos y los oxidantes es un aspecto separado de la reducción de la calidad de vida debida a este tipo de contaminantes. El smog y la neblina del que me quejaba en los párrafos introductorios de este capítulo, y que enmascaran una buena parte del verano del hemisferio norte, es en su mayor proporción una niebla de gotas de ácido sulfúrico.

Cualquier observador distante del odioso debate europeo o norteamericano sobre la lluvia ácida puede tener la impresión de que ésta se debe a la combustión de productos fósiles ricos en azufre en las centrales térmicas, hornos industriales y sistemas de calefacción doméstica. Tanto el carbón como el petróleo contienen alrededor de un uno por ciento de azufre. Este elemento abandona los tubos de las chimeneas en forma de dióxido de azufre, gas que se oxida en ácido sulfúrico y se condensa en gotas que atraen el vapor de agua del aire para formar una niebla o neblina ácida. Esta finalmente sedimenta o es arrastrada por la lluvia. Cuando cae en tierras ricas en rocas alcalinas como las calizas, y particularmente en los casos de zonas con escasez de azufre, su contribución es bienveni-

da. Por el contrario, cuando cae sobre tierra que ya es ácida de por sí su contribución es inoportuna y potencialmente destructiva. Canadá, Escandinavia, Escocia y muchas otras regiones norteañas están constituidas por rocas antiguas, los residuos duros e insolubles de eones de erosión. Los ecosistemas que sobreviven en estos terrenos poco prometedores y a menudo ácidos tienen menos capacidad de resistir el efecto de la acidificación. Desde los países de estas regiones surge una queja justificada de que sus vecinos industriales los están destruyendo. Para los canadienses y los escandinavos la necesidad de que cese la emisión de dióxido de azufre desde los países situados a «sotavento» es incuestionable. Son pocos los que pueden dudar de la justificación de sus quejas, pero lógicamente los agresores son reticentes a gastar las grandes cantidades de dinero necesarias para parar los escapes de dióxido de azufre de sus industrias y centrales térmicas. La contribución geofisiológica a este debate consiste en hacer notar que esta acidez puede tener otro origen además del vinagre sulfúrico de los vecinos. La adaptación de eliminadores de dióxido de azufre a las chimeneas puede aligerar pero no remediar el problema. La fuente menospreciada de ácido es el transportador natural de azufre, el sulfuro de dimetilo. Durante los dos últimos años, Meinrat Andreae y Peter Liss (oceanógrafos químicos que trabajan, respectivamente, en Florida y el Reino Unido) han mostrado que la emisión de este gas por parte de floraciones fitoplanctónicas en la superficie de los océanos alrededor de Europa occidental es tan grande que puede ser comparada con las emisiones totales de azufre por la industria de esta región. Además, las emisiones de fitoplancton son estacionales y parece que coinciden con los episodios de máxima precipitación ácida.

En tal caso puede preguntarse, con razón, ¿por qué no se ha observado contaminación hasta ahora? Si el sulfuro de dimetilo marino es la fuente de ácido sulfúrico ¿por qué Escandinavia no ha sufrido siempre los efectos nocivos de la precipitación ácida? De hecho, dos cambios ocurridos en los años recientes pueden haber convertido la transferencia natural de azufre del mar a tierra en una maldición en lugar de una bendición. Antes de que Europa se industrializase intensamente, el sulfuro de dimetilo probablemente era

transportado desde el mar hasta distancias lejanas tierra adentro por el viento del oeste y dejaría caer su azufre de manera diluida sobre una vasta área. La industrialización no sólo ha incrementado la carga total de ácido sino que también ha aumentado de manera muy importante la abundancia de óxidos de nitrógeno y otras especies químicas provenientes de la combustión. Estas pueden reaccionar bajo la luz del Sol y producir hidroxilo, el potente oxidante. La fuente más importante de estos productos es la máquina de combustión interna que mueve el transporte individual y público. Los radicales hidroxilo en la actualidad se encuentran en una abundancia por lo menos diez veces superior a la correspondiente antes de que el transporte privado fuera ubicuo. Debido a ello, el sulfuro de dimetilo que se solía oxidar lentamente sobre toda Europa puede ahora verter su carga ácida rápidamente en las regiones cercanas a la costa en que el aire del mar se encuentra con el aire contaminado.

Además de este incremento en la tasa de oxidación, y por tanto de producción ácida, probablemente la emisión de sulfuro de dimetilo ha aumentado por sí misma en los últimos años. Patrick Holligan, del Laboratorio de Biología Marina de Plymouth, me explicó que fotografías de satélite han mostrado la presencia de floraciones densas de algas que se congregan alrededor de los deltas fluviales continentales de Europa. Peter Liss y sus colegas han encontrado que estas floraciones de algas emiten sulfuro de dimetilo, aparentemente estimuladas por los aportes ricos en nutrientes provenientes de los ríos de Europa. El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, y el incremento de aguas residuales urbanas en los ríos que descargan en el mar del Norte y en el canal de la Mancha han sobrealimentado el mar que se encuentra encima de la plataforma continental europea tendiendo a transformarlo en algo parecido a un estanque de patos. El incremento relativo de ácido que proviene de esta fuente todavía no se conoce. Puede que resulte insignificante. Sin embargo, los legisladores prudentes preocupados por las lluvias ácidas deben recomendar a sus asesores científicos que investiguen la importancia relativa de las diversas fuentes de ácido. Mi simpatía personal se encuentra con aquellos que demandan ac-

ción inmediata sobre la base de que el principal culpable se encuentra en las emisiones de dióxido de azufre. Sin embargo me pregunto qué pasaría si reducir las no sirviese de nada. Entonces, si éste fuese el mejor sistema para prevenir la precipitación de lluvias ácidas, ¿estarían los gobiernos dispuestos a emprender las acciones más caras de reforma de alcantarillado o de control de emisiones de óxido de nitrógeno?

El asunto de la lluvia ácida es un tema que tiene mucho más de político y económico que de ciencia ambiental. Antes de aceptar como inevitable la larga y costosa batalla que involucra intereses nacionales e internacionales es interesante volver atrás y reexaminar lo ocurrido con la batalla del ozono. Se encuentran algunos paralelismos interesantes y quizás algunas lecciones que aprender.

El dilema de los dermatólogos: ozonemia

A finales de los años sesenta desarrollé un aparato sencillo capaz de detectar los clorofluorocarbonos (CFC) en la atmósfera hasta niveles de partes por trillón en volumen. Esta sensibilidad es primorosa, pues a semejantes concentraciones incluso los productos químicos más tóxicos podrían ser inspirados o tragados indefinidamente sin originar daño alguno. En 1972 utilicé este aparato en el viaje a la Antártida y de regreso a bordo del *Ry Shackleton* (véase capítulo 6). Las medidas que hice en este barco mostraron que los CFC se encontraban distribuidos por todo el medio ambiente. Se encontraban unas 40 partes por trillón en el hemisferio sur y entre 50 y 70 en el norte. Cuando di a conocer estos descubrimientos en un trabajo publicado en la revista *Nature* en 1973 estaba preocupado por el hecho de que algún fanático utilizase estos datos como base para una historia catastrófica. Tan pronto como se asocian números a un resultado estos números parecen darle una importancia falsa. Lo que antes era una simple traza se convierte en un peligro potencial. Cuando los hipocondríacos se enteran de que su presión sanguínea es 110/60 se preocupan: «Doctor, ¿seguro que no es demasiado bajo?». En calidad de médico planetario putativo sentí la necesidad de añadir al principio del trabajo la

frase, «la presencia de estos compuestos no constituye ningún peligro potencial». Esta frase se ha convertido en uno de mis mayores desatinos. Por supuesto, tendría que haber dicho, «en su concentración actual estos compuestos no constituyen ningún peligro concebible». Incluso entonces sabía que si las emisiones continuaban sin control se acumularían hasta que algún día cerca del final del siglo constituirían un peligro. No sabía nada acerca de la amenaza a la capa de ozono, pero sabía que estos gases se encontraban entre los de mayor efecto invernadero potencial y que si llegaban a concentraciones de partes por billón las consecuencias climáticas de su presencia podrían ser serias. Esta opinión se encuentra registrada en las actas de una reunión sobre clorofluorohidrocarburos celebrada en Andover, Massachusetts, en octubre de 1972.

Durante los años setenta existía el temor a una catástrofe inminente. «El frágil escudo de la Tierra», la capa de ozono, se decía estar en inminente peligro de destrucción como consecuencia de la emisión de óxido nítrico a la estratosfera asociado a los gases de las toberas de los aviones supersónicos. El químico atmosférico Harold Johnson fue el primero en alertarnos de esta amenaza particular. Entonces Ralph Cicerone y su colega Richard Stolarski atrajeron nuestra atención, al principio a modo de tentativa, hacia el cloro como otro peligro para el ozono. Luego, en 1974, apareció en la revista *Nature* un trabajo de Sherry Rowland y Mario Molina que argumentaba con gran claridad y fuerza que, como consecuencia de la fotoquímica estratosférica, los CFC eran una fuente importante de cloro y, por tanto, una amenaza a la capa de ozono. Este trabajo sigue siendo una cita de obligada referencia, un sucesor natural del libro de Rachel Carson *La primavera silenciosa*. Anunció el principio de la batalla del ozono. En su entusiasmo por la ciencia y la pelea los científicos, de modo poco característico, convencieron al público y a sí mismos de la necesidad de acciones inmediatas para prohibir las emisiones de CFC. A mí, cogido a contrapié por mi primer aserto de que los CFC no eran nocivos, la amenaza me parecía remota e hipotética. Sin embargo, me encontraba en minoría y los legisladores de muchas partes del mundo se convencieron de la necesidad de actuar precipitadamente y redactar leyes prohibiendo

los gases CFC como propelentes de los aerosoles. Es interesante preguntarse qué hay de especial en relación con el ozono que hizo que los legisladores actuaran de esta manera. Nadie moría por los efectos de las emisiones de CFC, las cosechas y la ganadería no se veían afectados por su presencia, los mismos productos se encontraban entre los más benignos que pueden entrar en nuestras casas, no son tóxicos, ni corrosivos ni inflamables. Ciertamente serían indetectables excepto por el instrumento que utilicé para su detección. Su presencia a niveles de entre 40 y 80 partes por trillón no representaba un peligro para la capa de ozono, incluso para el ecologista más comprometido. La preocupación venía del hecho de que las emisiones crecían exponencialmente y si la velocidad de crecimiento de los años sesenta continuaba hasta el final de la centuria habría una disminución de ozono entre un 20 y un 30 por ciento. Lo cual sería desastroso.

El ozono es un gas azul oscuro, explosivo y muy venenoso. Es sorprendente que tanta gente lo haya considerado como si se tratase de una de esas especies hermosas en peligro de extinción. Sin embargo, la moda de los años setenta consistía en protestar por los peligros ambientales de la misma manera que en generaciones anteriores consistía en la afición por los sortilegios. No era fácil oponerse a la creencia general de que sólo una acción inmediata por parte de científicos y políticos podía salvarnos a nosotros y a nuestros hijos de una inevitable disminución de la capa de ozono y las consecuencias espantosas de un flujo siempre creciente de radiación ultravioleta cancerígena. En esta época fue también cuando la palabra «producto químico» se convirtió en algo peyorativo y todos los productos de la industria química se consideraban como malos, a no ser que se probase su inocuidad. En una atmósfera más objetiva podríamos haber contemplado las predicciones catastróficas como muy exageradas -algo para controlar de cerca pero no algo que requiriese una legislación inmediata-. Sin embargo, los años setenta no eran un tiempo para contemplar las cosas a largo plazo y de una manera fría.

Los principales científicos y abogados preocupados por el tema de los fluorohidrocarburos se encontraron en 1976, en la Universidad

de Logan, la pequeña ciudad de las Montañas Rocosas. Entre los presentes se encontraba Ralph Cicerone, quien lanzó en primer lugar la hipótesis de que el cloro de la estratosfera podía catalizar la destrucción del ozono, y Mario Molina y Sherry Rowland, los que desarrollaron la secuencia de reacciones complejas que explican por qué los CFC podían constituir la fuente de cloro y esbozaron los detalles intrincados del mecanismo de destrucción. También había científicos de la industria y de las agencias de control estatal, y por supuesto abogados y legisladores. La reunión podía haber consistido en un debate razonable tratando de ponerse de acuerdo acerca del límite superior de CFC a la luz de los conocimientos actuales. En lugar de ello se trató de una especie de consejo de guerra tribal en que se tomó la decisión de luchar. Cualquiera que no estuviera de acuerdo con la prohibición inmediata de los CFC era claramente un traidor a la causa. Nunca olvidaré la disputa entre el Comisionado R.D. Pittle y el doctor Fred Kaufman, quien representaba a la Academia de Ciencias de Estados Unidos. El comisionado había olvidado que no se encontraba en el juzgado y pedía una respuesta afirmativa o negativa acerca de si se debía prohibir los CFC. En cierto modo me recordó otra disputa celebrada hacía mucho tiempo: la celebrada entre Galileo y las autoridades de su tiempo.

Los procesos científicos son muy diferentes a los jurídicos. Ambos han evolucionado para satisfacer las necesidades de sus usuarios. Las hipótesis científicas se evalúan por la exactitud de sus predicciones; el establecimiento de un hecho científico no afecta de manera apreciable al universo, sólo modifica el conocimiento científico. Por el contrario, los hechos legales se evalúan en un debate controvertido y se establecen por sentencia. El establecimiento de un hecho legal cambia la sociedad desde el momento en que se dicta. En el mejor de los casos, casi con toda certeza, ciencia y ley no encajan bien. En Logan se intentaron formular sentencias legales basándose en hipótesis científicas no comprobadas. No es sorprendente que los resultados fuesen poco dignos de crédito para cualquiera de los participantes.

Otra vez se olvidó el criterio de Paracelso de que el veneno es la dosis y se colocó en su lugar el santo y seña de «cero». El grito fue: «No hay nivel seguro de radiación ultravioleta. La radiación ultravioleta, como los otros cancerígenos, debería ser reducida a cero». De hecho la radiación ultravioleta es parte de nuestro ambiente natural y ha estado en él tanto tiempo como la vida misma. La esencia de los seres vivientes es el oportunismo. La radiación ultravioleta, aunque es potencialmente dañina, también puede ser utilizada por los organismos vivos para la fotosíntesis de la vitamina D. Cuando se convierte en una amenaza puede ser evitada sintetizando pigmentos como la melanina para absorberla.

Todavía existe una laguna de conocimiento acerca de las relaciones entre los ecosistemas naturales y la radiación ultravioleta a la que están expuestos. Sin embargo, sabemos que la radiación ultravioleta varía siete veces (700 por ciento) en intensidad entre el Ártico y los trópicos mientras que la luz visible sólo varía 1,6 veces (160 por ciento) en el mismo rango de latitud. A pesar de este amplio intervalo de intensidad, no hay ninguna región en que el crecimiento de la vegetación esté limitado por la luz ultravioleta. Por el contrario, un cambio del orden de siete veces en la tasa pluviométrica es lo que determina la diferencia entre bosques y desiertos. No hay desiertos ultravioleta en la Tierra y la vida parece estar bien adaptada a la radiación a lo largo de todo el rango de intensidades. Los daños parecen circunscribirse a algunas especies emigrantes desde latitudes altas a bajas. Tampoco hay ninguna evidencia de que una carencia de radiación ultravioleta pueda ser dañina para las especies que migran desde los trópicos a las regiones templadas.

La exposición a cualquier radiación cuántica de alta energía que penetra en la piel puede dañar el material genético de nuestras células y degradar sus programas de instrucciones. Entre los efectos adversos se encuentra la transición desde el crecimiento normal al maligno. Este es un tema aterrador, pero podemos mantener la calma si recordamos que estas consecuencias carcinogénicas no son diferentes de las derivadas de respirar oxígeno, que también es un cancerígeno. Respirar oxígeno es quizá lo que pone límite a la duración de la vida de la mayoría de los animales, aunque no respi-

rarlo es letal de manera incluso más rápida. Existe un nivel de oxígeno adecuado, el 21 por ciento; más o menos de esta cantidad puede resultar dañino. Fijar a nivel cero el oxígeno para prevenir el cáncer sería algo totalmente equivocado.

En general, las guerras no empiezan por un incidente aislado y éste era también el caso de la guerra del ozono. Las bases históricas se encontraban, tal como se ha indicado en el capítulo 4, en la propuesta de Berkner y Marshall de que la colonización de las superficies terrestres del planeta no tuvo lugar hasta que el oxígeno y su alótopo, el ozono, no entraron en la atmósfera. Ellos sostenían que el ozono impide la penetración de radiación ultravioleta dura, que en caso contrario mantendría la tierra estéril e inhabitable para la vida. Era una hipótesis científica razonable y evaluable. En realidad fue evaluada por mi colega Lynn Margulis quien la refutó mostrando que las algas fotosintéticas pueden sobrevivir cuando se exponen a radiación ultravioleta equivalente a la de la luz del Sol no filtrada por la atmósfera. Sin embargo esto no impidió que la hipótesis se convirtiera en uno de los grandes mitos científicos del siglo, aunque es ciertamente falsa y únicamente sobrevive debido a la división que separa las ciencias. Los físicos contemplan la biología como algo extraterritorial y la misma opinión tienen los biólogos de la física. Los miembros de cada disciplina tienden a aceptar de manera acrítica las conclusiones de los otros. Esta compartimentación es un triunfo de la especialización sobre la ciencia y se manifiesta con suma inocencia cuando los científicos tienden a explicar separadamente los aspectos físicos y biológicos de sus resultados como una consecuencia necesaria de su especialización. Los biólogos que están preocupados por los efectos de los rayos ultravioleta saben que éstos son tanto beneficiosos como dañinos.

Hasta ahora no tenían razones para dudar de la experiencia de sus colegas físicos, y por tanto sólo consideraban las consecuencias del decrecimiento del ozono. Por otra parte, la mayoría de físicos no son conscientes de que la radiación ultravioleta también puede reportar beneficios. En consecuencia, tienden a pensar en el incremento de la capa de ozono como un beneficio. Sin embargo, las enfermedades por falta de vitamina D -raquitismo y osteomalacia-

están asociadas a una exposición reducida a la radiación ultravioleta. También parece ser que la incidencia de esclerosis múltiple varía con la latitud de manera recíproca al cáncer de piel. La variación del color de piel con la latitud sugiere que nos hemos adaptado, en ausencia de migración, a los niveles de radiación ultravioleta de nuestros hábitats.

Una vez más el ozono es noticia. J.C. Farman y B.G. Gardiner, del British Antarctic Survey, han descubierto una disminución de la capa de ozono en las regiones subpolares. Además, esta disminución ha aumentado rápidamente cada año hasta que ahora casi es un agujero. Este acontecimiento es inesperado y contrasta con el hecho de que en la mayor parte del mundo el nivel de ozono no ha cambiado o incluso ha crecido ligeramente. Sin embargo se trata de un tema interesante e inquietante. ¿Qué pasaría si el agujero se extendiese y amenazase regiones pobladas? Antes de comprometerse profundamente vale la pena preguntarse cuáles fueron los beneficios del primer conflicto sobre el ozono. ¿Quién ganó y quién perdió? Los únicos perdedores claros fueron las industrias pequeñas y sus empleados que dependían del uso de los CFC en los productos que fueron prohibidos. Por razones diversas y complejas, los fabricantes de CFC no se vieron afectados de manera importante. La pérdida de la dudosamente rentable sección de propelentes-CFC de su mercado, junto con la racionalización de su industria, no modificó sensiblemente su economía. Los políticos y los movimientos ecologistas perdieron un poco de su credibilidad pero la memoria de la gente tiende a ser de corta duración. Los vencedores claros fueron la ciencia y los científicos. Se desembolsaron vastas sumas para la investigación atmosférica que nunca hubieran estado disponibles sin la guerra del ozono. Ahora sabemos mucho más acerca de nuestra atmósfera y este conocimiento será esencial para entender otros problemas atmosféricos. Entre ellos se encuentra el efecto invernadero de los gases atmosféricos minoritarios. Hay tres propiedades de los CFC que los hacen peligrosos. Primero, sus tiempos de vida media atmosférica tan largos, que les permiten acumularse sin control; segundo, su capacidad para transportar su carga de cloruro directamente y sin pérdidas a la estratosfera y, tercero, la

intensidad con que absorben radiación infrarroja de onda larga. Su presencia en la atmósfera es un factor adicional al del efecto invernadero del dióxido de carbono. Ello representa un peligro potencialmente mucho más serio que el de la disminución de ozono. Tenemos razón en estar agradecidos a uno de los pioneros acerca de la preocupación por los CFC, Ralph Cicerone, por haber centrado la atención en el problema ciertamente más grave de su efecto invernadero.

Es posible que estuviera equivocado al oponerme a los que demandaban leyes inmediatas para parar las emisiones de CFC. Me parece que el extraño fenómeno sobre las regiones del Polo Sur puede constituir una advertencia con sorpresas todavía más serias de aparición próxima. Parece posible que otras alteraciones, incluyendo el incremento concomitante de CO₂ y metano debido a la industria humana y a la agricultura, sean responsables del efecto extra de los compuestos clorados en las regiones polares. En este sentido albergo pocas dudas de que sin el cloro derivado de los gases industriales no hubiera habido adelgazamiento de la capa de ozono en el Polo Sur. Los CFC y otros halohidrocarburos se han incrementado en un 500 por ciento desde que los medí en 1971. Entonces eran inocuos, pero ahora hay demasiados gases halohidrocarbonados en el aire. Ahora se notan los primeros síntomas de envenenamiento y me uno a aquellos que querían regular las emisiones de CFC y otros transportadores de cloro a la estratosfera.

Para volver a nuestra analogía clínica, podríamos decir que el miedo al cáncer de piel como consecuencia de la disminución de ozono dio lugar al principio a una hipocondría global, algo adquirido de una manera demasiado fácil debido a la identificación de nuestros temores con el relato plausible de síntomas descritos en un libro de texto. Los buenos médicos saben que la hipocondría puede ser una llamada de socorro y que oculta la existencia de una enfermedad real, quizás ello también es verdad con respecto al estado de salud global. Estos temores sobre los CFC y la capa de ozono ¿pueden haber presagiado el descubrimiento del agujero de ozono y el efecto invernadero climático amenazante de los CFC?

Una dosis de radiación nuclear

Carl Sagan hizo notar una vez que si un astrónomo extraterrestre mirase hacia el sistema solar en la región de radiofrecuencias del espectro electromagnético, observaría un objeto muy notable. Dos estrellas eclipsándose la una a la otra: una de ellas normal, pequeña, correspondiente a la secuencia principal, y la otra muy pequeña pero intensamente luminosa con una temperatura superficial aparente de millones de grados: nuestra Tierra. Este científico distante que nos observase podría especular acerca de la naturaleza de la fuente de energía que alimenta lo que parecería ser uno de los objetos más calientes de la galaxia. Me pregunto cuán arriba en la lista de fuentes probables de energía se situaría la energía química. ¿Se incluiría energía proveniente de la reacción entre combustibles fósiles y el oxígeno de las plantas?

Es fácil ignorar el hecho de que somos algo anómalo. La energía natural del universo, la que enciende las estrellas del cielo, es nuclear. La energía química, el viento y las norias son, desde el punto de vista de un gestor del universo, tan raros como una estrella que queme carbón. Si ello es así, y si el universo de Dios está alimentado por energía nuclear, ¿por qué hay tantos individuos prestos a manifestarse en protesta contra su utilización para proporcionarnos energía eléctrica?

Los temores se alimentan de la ignorancia, y se abrió un gran hueco para el miedo cuando la ciencia empezó a hacerse incomprendible para aquellos que no la practican. Cuando se descubrieron los rayos X y los fenómenos nucleares al final de la última centuria, fueron considerados como algo muy beneficioso para la medicina - la visión casi mágica del esqueleto viviente y los primeros sistemas para paliar, e incluso a veces curar, el cáncer. Roentgen, Becquerel, y los Curie son recordados con afecto por lo que hicieron de bueno sus descubrimientos. Con toda seguridad también había una cara oscura, y demasiada radiación es un veneno lento y desagradable. Sin embargo, incluso el agua puede matar si se ingiere en exceso.

En general se admite que el cambio de actitud hacia la radiación provino de nuestra reacción contra la primera mala utilización de la energía nuclear en Hiroshima y Nagasaki.

Pero la cosa no es tan sencilla. Me acuerdo bien de que las primeras plantas nucleares eran una especie de orgullo nacional porque liberaban tranquilamente su beneficio de energía sin la gran contaminación de los quemadores de carbón que reemplazaban. Había una gran fascinación inocente entre el final de la segunda guerra mundial y el principio de los movimientos de protesta de los sesenta. ¿Qué es lo que fue mal?

En realidad nada fue mal, lo que ocurre es que la radiación nuclear, los pesticidas y los depresores de ozono comparten la propiedad común de que son fácilmente medibles y controlables. La asignación de un número a cualquier cosa le proporciona un sentido que antes no tenía. A veces, como pasa con el número de teléfono, es realmente valioso. Sin embargo, algunas observaciones -por ejemplo que la abundancia de perfluorometilciclohexano atmosférico es $5,6 \times 10^{-25}$ o que durante la lectura de esta línea de texto por lo menos se han desintegrado dentro del lector un centenar de miles de átomos- aunque son científicamente interesantes no proporcionan ningún beneficio ni tienen ninguna importancia para la salud. No son de interés para la opinión general.

Sin embargo, cuando se asocian números a una propiedad ambiental la gente de la calle encuentra pronto justificada su medida y en poco tiempo se crea una base de datos con información acerca de la sustancia X o la radiación Y. Tras el pequeño paso de comparar los contenidos de diferentes bases de datos, dentro de la naturaleza de las distribuciones estadísticas, se encontrará una correlación entre la sustancia X y la incidencia del mal Z. No es una exageración indicar que cuando un investigador curioso encuentra una vía abierta a un espacio semejante, éste se rellenará por el crecimiento oportunista de profesionales hambrientos y sus predadores. Un nuevo subconjunto de la sociedad se ocupará del negocio de vigilar la sustancia X y la enfermedad Z, no digamos de los que fabricarán los instrumentos para llevarlo a cabo. También habrá abogados que establecerán la legislación para que la apliquen los burócratas, y así

sucesivamente. Tengamos en cuenta el tamaño y la complejidad de las agencias de control de radiaciones, de la industria que fabrica aparatos de medida y protección y de la comunidad académica que se dedica a los efectos de la radiación sobre los seres vivos. La disipación del fuerte miedo público a la radiación no contribuiría a la continuidad de sus puestos de trabajo. Podemos observar que existe una retroalimentación muy biológica, gáiana, en las relaciones de nuestra comunidad con el medio ambiente. No es una conspiración o una actividad motivada egoístamente. No hace falta nada de ello para mantener la curiosidad incesante de los exploradores y los investigadores, y siempre hay oportunistas esperando para alimentarse de sus descubrimientos.

Por si todo esto no fuese suficiente, están los medios de comunicación para distraernos. En la industria nuclear tienen un culebrón permanente sin que les cueste ni un duro. Incluso se puede experimentar la excitación de un desastre verdadero, como el de Chernobyl, en el que, como en la ficción, sólo mueren unos pocos héroes. Es verdad que se han hecho estimaciones de las muertes por cáncer que podrían producirse en toda Europa como consecuencia del suceso de Chernobyl, pero para ser coherente también hay que preguntarse acerca de las muertes por cáncer por respirar los smogs de humo de carbón de Londres y contemplar un trozo de carbón con el mismo terror que ahora se reserva para el uranio. Cuán diferente es el miedo a morir por accidentes nucleares en comparación con los lugares comunes del registro aburrido de muertes en las carreteras, fumar cigarrillos, o trabajos de minería -que tomados todos juntos son equivalentes a miles de sucesos como el de Chernobyl por día.

Fue Rachel Carson, con su libro oportuno y sugerente. Primavera silenciosa, quien empezó el movimiento ecologista y nos hizo ser conscientes del daño que podemos causar tan fácilmente al mundo que se encuentra a nuestra alrededor. Sin embargo, no creo que hubiera podido elaborar su denuncia contra el envenenamiento por pesticidas sin el descubrimiento anterior de que los pesticidas de uso agrícola estaban distribuidos de manera ubicua por toda la biosfera. Incluso se podían asociar números a las cantidades de

pesticidas totalmente insignificantes en la leche de las madres que amamantan o en la grasa de los pingüinos del Antártico. En tiempos de Rachel Carson, los pesticidas eran un peligro real y el ciego incremento exponencial de su uso ponía en peligro nuestro futuro. Sin embargo, se ha respondido adecuadamente y esta experiencia no debería ser extrapolada a todos los riesgos ambientales, reales o imaginarios.

Los párrafos subsiguientes no pretenden ser una defensa de la energía nuclear, ni implican que soy un enamorado de ella. Mi preocupación consiste en que la discusión sobre este tema, tanto a favor como en contra, nos distrae del problema serio y real de vivir en armonía con nosotros mismos y el resto de la biosfera. Estoy lejos de ser un admirador incondicional de la energía nuclear. A menudo tengo la visión de pesadilla del invento de una fuente de energía basada en la fusión nuclear que fuera simple y ligera. Sería una caja pequeña, del tamaño de una guía de teléfonos con cuatro enchufes ordinarios empotrados en su superficie. La caja inspiraría aire y extraería hidrógeno a partir de su humedad, el cual alimentaría una fuente de energía de fusión nuclear calibrada para proporcionar un máximo de 100 kilovatios. Sería barata, fiable, fabricada en Japón, y disponible en cualquier parte. Sería la fuente de energía perfecta, limpia y segura. Nunca se escaparía ningún residuo nuclear ni radiación, y nunca podría fallar peligrosamente.

La vida se transformaría. Energía gratis para uso doméstico; no sería necesario ni pasar frío en invierno ni calar en verano. Transporte privado sencillo, elegante y libre de contaminación estaría disponible para cualquiera. Podríamos colonizar los planetas e incluso desplazarnos más allá para explorar el sistema de estrellas de nuestra galaxia. Así es como se podría vender el producto, pero la realidad ciertamente se varía ominosamente descrita por la famosa frase de Lord Acton, «El poder -la energía- tiende a corromper y el poder -la energía- absoluto corrompe absolutamente».^(*) El pensaba en el poder político pero la frase también podría ser plenamente

* El autor juega con el doble sentido de power, que en inglés puede significar <poder> o «energía». (N. del T.)

válida para la electricidad. En la actualidad ya estamos transformando los hábitats de nuestros compañeros en Gaia con monocultivos agrícolas que utilizan combustibles fósiles baratos. La hacemos más deprisa del tiempo que tenemos para pensar acerca de las consecuencias. Imaginemos lo que podría pasar con energía gratis e ilimitada.

Si no podemos desinventar la energía nuclear espero que se mantenga tal cual es. Las centrales de energía son grandes y lentas de construir y el bajo costo de la energía misma se ve compensado por la gran inversión de capital requerida. Los temores generales, a pesar de que no sean razonables, a veces actúan en forma de retroalimentación negativa sobre el crecimiento desbocado. Nadie, gracias a Dios, puede inventar una sierra eléctrica movida por una fuente de energía nuclear de fusión que pudiera cortar una selva tan deprisa y tan descuidadamente como cortamos un árbol.

Estas opiniones pueden parecer una traición a mis colegas ecologistas, muchos de los cuales han estado al frente de las protestas contra la energía nuclear. De hecho nunca he considerado la radiación o la energía nuclear como algo diferente a una parte normal e inevitable del medio ambiente. Nuestros ancestros procarióticos evolucionaron en una masa del tamaño de un planeta formada a partir de los residuos de una explosión nuclear del tamaño de una estrella, una supernova que sintetizó los elementos que luego constituyeron nuestro planeta y nosotros mismos. No somos las primeras especies en experimentar con reactores nucleares, tal como ya ha sido descrito antes en este libro.

Estoy en deuda con el doctor Thomas de las Universidades Asociadas de Oak Ridge quien me describió un nuevo punto de vista acerca de la naturaleza de las consecuencias biológicas de la radiación nuclear. Cuando escuché sus palabras, expresadas en la calmada intimidad de su habitación, sentí la misma emoción descrita por Keats en sus versos acerca de la primera vez que leyó el libro de Chapman, Homero. Lo que el doctor Thomas decía puede que no sea más que una hipótesis, pero para mí era un material muy sugerente. Consideremos su planteamiento: «Supongamos que los efec-

tos biológicos de la exposición a la radiación nuclear no son diferentes de los resultantes de respirar oxígeno».

Hace tiempo que sabemos que los agentes dañinos dentro de la célula viva tras el paso de un fotón de rayos X o de algún fragmento atómico que se mueve rápidamente, son un surtido de productos químicos quebrados; cosas llamadas radicales libres que son compuestos químicos reactivos y destructivos. Cuando un fotón de rayos X pasa a través de la célula, la radiación corta los enlaces químicos de la misma manera que una bala puede partir venas y nervios. En gran medida la mayor parte de su destrucción afecta a moléculas de agua ya que éstas son las más abundantes en la materia viva. Las piezas rotas de una molécula de agua en presencia de oxígeno forman una sucesión de productos destructivos que comprende el hidrógeno y los radicales hidroxilo, el ión superóxido y peróxido de hidrógeno. Todos ellos son capaces de dañar de manera irreversible los polímeros genéticos que contienen las instrucciones de la célula. Todo lo descrito no es más que un resumen de los conocimientos convencionales. El nuevo punto de vista del doctor Thomas consiste en recordarnos que los mismos productos químicos destructivos están siendo sintetizados todo el tiempo, en ausencia de radiación, debido a pequeñas ineficiencias dentro del proceso normal del metabolismo oxidativo. En otras palabras, por lo que concierne a nuestras células, los daños causados por la radiación nuclear y los daños debidos a la respiración de oxígeno son casi indistinguibles.

El valor especial de esta hipótesis consiste en que sugiere una regla simple para comparar estas dos propiedades dañinas del medio ambiente. Si el doctor Thomas tuviese razón, entonces los daños provenientes de la respiración serían equivalentes a una dosis de radiación en todo el cuerpo de 100 roentgens por año. Acostumbraba a preguntarme acerca de la relación entre riesgo-beneficio de un examen médico por rayos X. Una radiografía en un hospital normal en el pecho o en el abdomen podría liberar 0,1 roentgens, lo suficiente para ennegrecer la película de un monitor de radiación personal y causar terror a los habitantes de Three Mile Island. Ahora, gracias al doctor Thomas, veo esta cantidad como algo no superior

a una milésima del efecto de respirar durante un año. O, para expresarlo de otra forma, respirar es cincuenta veces más peligroso que la suma total de radiaciones que normalmente recibimos de todas las fuentes.

De nuevo se nos aparecen las batallas ancestrales al final del Arcaico contra la porción planetaria del oxígeno. Los sistemas vivos han inventado contramedidas ingeniosas: antioxidantes como la vitamina E para eliminar los radicales hidroxilo, superóxido dismutasa para destruir el ión superóxido, y otros medios numerosos para disminuir los efectos destructivos de la respiración. Sin embargo, parece probable que el tiempo de vida de la mayoría de animales venga dado por el límite superior de la cantidad de oxígeno que pueden utilizar sus células antes de que sufran un daño irreversible. Animales como el ratón tienen una tasa metabólica específica mucho más rápida que la nuestra y más o menos viven sólo un año, aún en el caso de estar protegidos contra la predación. El oxígeno mata de forma parecida a como lo hace la radiación nuclear, destruyendo las instrucciones acerca de la reproducción y reparación que se encuentran dentro de nuestras células. Por tanto el oxígeno es mutagénico y carcinógeno, y respirarlo fija el límite de nuestro tiempo de vida. Sin embargo, el oxígeno abrió a la vida una amplia gama de posibilidades que no estaban al alcance del humilde mundo anóxico. Sólo para mencionar una de ellas: se necesita oxígeno molecular libre para la biosíntesis de los aminoácidos estructurales hidroxilisina e hidroxiprolina. Estos son elementos de los componentes estructurales que constituyen los árboles y animales.

Paul Crutzen, un químico de la atmósfera, fue el primero en llamar nuestra atención hacia las consecuencias geofisiológicas a largo plazo de una guerra nuclear a gran escala, el «invierno nuclear». A menudo necesitamos que se nos recuerde lo malo que puede ser el castigo final para que permanezca como una amenaza. Sin embargo, de modo parecido al oxígeno, la energía nuclear nos proporciona oportunidades y desafíos para aprender a vivir con ella.

La enfermedad real

Cuando las cosas van mal, o cuando contemplamos una parte particularmente negativa del proceso de destrucción ambiental, a menudo decimos que la humanidad es como el cáncer del planeta. Los seres humanos crecen en un número incontrolado y son capaces de destruir lo que se pone en contacto con ellos. ¿Fue el miedo al cáncer, el gran tema de referencia de todos los ecologistas demagogos, lo que agitó nuestras preocupaciones sobre la Tierra? Si es así, podemos dejar de preocuparnos. La vida existe en formas muy diversas y entre ellas ni los organismos unicelulares ni Gaia padecen esta forma única de rebelión que es el cáncer. Este problema se encuentra circunscrito a los metafitos y metazoos, aquellas formas de vida, tales como los árboles y los caballos, que consisten en grandes comunidades celulares altamente organizadas. La gente no es, de ninguna manera, como un tumor. El crecimiento maligno en un animal requiere la transformación de las instrucciones registradas en los genes de la célula. Así, los descendientes de la célula transformada crecen de forma independiente del sistema animal. Sin embargo, la independencia nunca es completa; incluso las células cancerosas responden y contribuyen hasta cierto punto al sistema. Para ser como el cáncer primero necesitaríamos convertirnos en una especie diferente y luego constituir una parte de algo mucho más organizado que Gaia.

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

Cuando escribí el primer libro sobre Gaia, hace casi diez años, me parecía que podían existir ecosistemas críticos cuya transformación o eliminación podía tener consecuencias serias para el conjunto de organismos que ahora habitan la Tierra y la encuentran confortable.

Las selvas de los trópicos húmedos y los ecosistemas acuáticos de las plataformas continentales parecían ser vitales para mantener el statu quo ambiental. En la actualidad nos encontramos ya con ejemplos de disfunción, en la forma de lluvia demasiado ácida como consecuencia de la proliferación de algas en las aguas sobrealimentadas de la costa de Europa. Del mismo modo, el deterioro general de los ecosistemas en algunas partes de África puede ser una consecuencia general de la eliminación de los árboles que allí crecían en su día.

Las enfermedades de Gaia no duran mucho respecto a su lapso de vida. Cualquier cosa que hace el mundo incómodo para vivir tiende a inducir la evolución de aquellas especies que pueden conseguir un medio ambiente nuevo y más hospitalario. Si el mundo se hace poco habitable por nuestra causa, existe la posibilidad de un cambio a otro régimen que será mejor para la vida, pero no necesariamente mejor para nosotros. En el pasado, los cambios de este tipo, tales como el salto de una glaciación a un período interglaciario, han tendido a ser interrupciones revolucionarias en lugar de evoluciones graduales.

Las cosas que le hacemos al planeta no son dañinas ni plantean una amenaza geofisiológica a no ser que las hagamos a gran escala. Si sólo fuésemos unos 500 millones de personas los que viviésemos en la Tierra casi nada de lo que ahora hacemos al medio ambiente perturbaría a Gaia. Por desgracia para nuestra libertad de acción vamos a convertirnos en 8.000 millones de personas con más de 10.000 millones de cabezas de ganado y 6.000 millones de aves de corral. Utilizamos la mayor parte del suelo productivo para hacer crecer un número muy limitado de especies cultivables y transformamos de manera ineficiente, en forma de ganado, una parte demasiado grande de esta comida. Además, nuestra capacidad de modificar el medio ambiente se ve fuertemente incrementada por el uso de fertilizantes, productos químicos ecocidas, y maquinaria pa-

ra mover la tierra y cortar los árboles. Cuando se toma todo ello en cuenta se concluye que verdaderamente estamos en peligro de desplazar la Tierra del estado adecuado en que antes se encontraba. No se trata solamente de un problema de población; la población densa de las regiones templadas del hemisferio norte puede representar una perturbación menor que la de los trópicos.

Para nosotros no hay supervivencia sin agricultura, pero parece que hay una diferencia enorme entre buena y mala agricultura. A mí me parece que este es el cambio geofisiológico mayor y más irreversible que hemos provocado. ¿Sería posible utilizar la tierra para alimentarnos y también mantener su papel climático y geofisiológico? ¿Podrían los árboles proporcionarnos nuestras necesidades y también servir para mantener los trópicos húmedos de lluvia? ¿Se podría bombear con nuestros cultivos el dióxido de carbono de forma parecida a los ecosistemas que sustituyen? Tendría que ser posible pero no sin un cambio drástico de sensibilidad y actitudes. Me pregunto si nuestros nietos serán vegetarianos, y si el ganado sólo vivirá en zoos y en parques de animales vivos domesticados.

En la medida que crece nuestra comprensión de los peligros inherentes a las actividades agrícolas se refuerza el criterio de los modelos convencionales. Así, los cambios a gran escala de los usos de la tierra, incluso en una sola región, tienen unos efectos que no se encuentran limitados a esa región exclusivamente. Desde un punto de vista geofisiológico ello nos recuerda que los efectos de la eliminación de bosques probablemente se suman a los del dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero. Incluso los modelos climáticos más complejos de la actualidad no pueden predecir las consecuencias de estos cambios. Un modelo completo requiere que se incluya el biota de manera que se reconozca su presencia activa y su preferencia por un intervalo estrecho de variables ambientales. Colocar al biota en una caja con entradas y salidas, como los modelos biogeoquímicos, no es posible. Por analogía, necesitamos la fisiología para comprender cómo mantenemos una temperatura propia constante cuando nos encontramos expuestos al frío o al calor; la bioquímica sólo puede decirnos qué reacciones producen calor en nuestros cuerpos, no cómo se regula nuestra temperatura.

Todavía no hay respuesta acerca de qué proporción de tierra de una región se puede transformar para actividades agrícolas o forestales sin perturbar de manera significativa el medio ambiente local o global. Es como preguntarse acerca de la cantidad de piel que se puede quemar sin producir la muerte. Esta pregunta fisiológica ha sido contestada a partir de la observación directa de las consecuencias de las quemaduras accidentales. No ha sido modelizada, por lo menos que yo sepa. Puede que un modelo geofisiológico detallado permita responder a una pregunta ambiental paralela. Sin embargo, si los conocimientos obtenidos acerca de fisiología humana son una guía de actuación, debemos concluir que probablemente la información que queremos provendrá de las conclusiones empíricas derivadas del estudio preciso de las consecuencias climáticas locales correspondientes a los cambios regionales en el uso de la tierra.

Un ecosistema como, por ejemplo, una selva en los trópicos húmedos es de alguna manera parecido a una colonia humana en la Antártida o en la Luna. Sólo se automantiene hasta cierto punto, y su existencia a largo plazo depende del transporte de nutrientes y otros elementos esenciales desde otras partes del mundo. Al mismo tiempo los ecosistemas y las colonias tienden a minimizar sus pérdidas conservando el agua, el calor y los nutrientes esenciales; a esta escala se autorregulan. Es conocido que las selvas tropicales se conservan húmedas porque modifican su medio ambiente para favorecer la lluvia. Tradicionalmente la ecología ha tendido a considerar los ecosistemas como algo aislado. La geofisiología nos recuerda que todos los ecosistemas se encuentran interconectados. Como analogía podemos decir que el hígado de todos los animales tiene una cierta capacidad de regulación de su medio ambiente interno y las células del hígado pueden crecer aisladas. Sin embargo, ningún animal puede vivir sin hígado ni ningún hígado puede mantenerse independientemente por sí solo; cada uno depende de la interconexión entre los dos. No sabemos si existen ecosistemas vitales para la Tierra aunque sería difícil imaginar que la vida continúe sin la presencia ubicua de las antiguas bacterias que viven en lugares oscuros y malolientes tales como el barro y las heces. Aquellas bacterias desarrolladas hace 3,5 eones cuyo sistema de

vida perfecto consistía en la transformación del carbono usado en gas metano y que han continuado haciendo lo mismo desde entonces. Los ecosistemas de las aguas de las plataformas continentales transfieren elementos como el azufre y el yodo al aire, y de allí a la tierra. Las selvas de los trópicos actúan a escala global bombeando grandes cantidades de agua al aire (evapotranspiración) lo que tiene el poder de afectar al clima local causando la condensación de nubes. La parte superior blanca de las nubes refleja la luz del Sol, que en caso contrario calentaría y secaría la región. La evapotranspiración del agua a partir de su estado líquido absorbe una gran cantidad de calor, y el clima de regiones distantes que se encuentran fuera de los trópicos es calentado considerablemente cuando las masas de aire húmedo liberan su calor latente durante la precipitación de lluvia. La transferencia de nutrientes y productos resultantes de la erosión por los ríos tropicales es evidentemente un aspecto de su interconexión y también tiene que tener un significado global.

Si la evapotranspiración o las contribuciones de los ríos tropicales al océano son vitales para el mantenimiento de la homeostasis planetaria actual, ello sugiere que su sustitución por una agricultura alternativa o un desierto no sólo negaría aquellas regiones a sus habitantes supervivientes sino que también amenazaría al resto del sistema. Todavía no lo sabemos, sólo podemos suponer que los sistemas de las selvas tropicales son vitales para la ecología mundial. También podría pasar que sean como los bosques de las zonas templadas, que parecen ser eliminables sin que se resienta todo el sistema en su conjunto. Los bosques templados han experimentado destrucciones masivas durante las glaciaciones y durante la expansión reciente de la agricultura. Por tanto parece que el punto de vista ecológico tradicional de examinar el sistema forestal aisladamente es tan importante como la consideración de su interdependencia con el sistema global. Desde un punto de vista geofisiológico nos encontramos en la etapa de recopilación de información, como lo estaba la biología cuando los científicos victorianos iban a las remotas junglas a recoger especímenes.

Debemos identificar cuáles son las necesidades de la Tierra, incluso si nuestro tiempo de respuesta es lento. Podemos ser altruistas y egoístas a la vez en una especie de interés propio inconscientemente inteligente. Ciertamente no somos el cáncer de la Tierra, ni la Tierra es una especie de ingenio mecánico que requiera los servicios de un mecánico.

Si es cierto que la teoría de Gaia proporciona una descripción bastante ajustada del sistema operativo de la Tierra, entonces con toda seguridad hemos estado visitando a los especialistas equivocados para el diagnóstico y la cura de nuestros males globales. Hay algunas preguntas que tienen que ser contestadas: ¿Hasta qué punto es estable el sistema presente? ¿Qué puede perturbarlo? ¿Se pueden invertir los efectos de una perturbación? Sin los ecosistemas naturales en su forma presente ¿puede el mundo mantener su clima y composición? Todas estas preguntas se encuentran dentro del dominio de la geofisiología. Necesitamos un experto en medicina planetaria. ¿Hay algún doctor allá afuera?

EL SEGUNDO HOGAR

Más vale ser bueno en casa que quemar incienso en algún sitio lejano.

(Proverbio chino)

Durante el verano de 1969 me encontraba en nuestra segunda residencia en las orillas de la bahía Bantry, la parte de Irlanda en que penínsulas rocosas largas y estrechas apuntan hacia el sudoeste, como dedos de una mano extendida hacia América. Era lunes, 21 de julio, el día en que los astronautas Neil Armstrong y Edwin Aldrin pasearon por la Luna. Las noticias de su histórico viaje nos llegaron por la radio. Tan montañosa y lejana era esa parte de Irlanda que nos fue negado el placer de ver el aterrizaje en una pantalla de televisión. Para nuestra familia, educada en la cultura científica contemporánea, el viaje a la Luna era una consumación. Para nuestros vecinos irlandeses de la península Beara era un terremoto mental que removió los fundamentos de sus creencias. A lo largo de toda la semana siguiente nos preguntaban. «¿Es realmente cierto que han aterrizado hombres en la Luna?». Estábamos perplejos por la pregunta y contestábamos: «Claro que es cierto, ¿no lo han oído en la radio?». Sí, lo habían oído, pero querían oír de nosotros que el hombre había llegado a la Luna.

Necesité algún tiempo, y varias observaciones de mis amigos y vecinos, Michael y Theresa O'Sullivan, para caer en la cuenta de que lo que era un hecho indudable para mí era, para la cultura diferente que me rodeaba, una noticia de significado mucho más profundo y grave. Para muchos de los que viven en la lejana península Beara, el cielo se encontraba simplemente arriba en el firmamento y el infierno debajo de sus pies. Su fe no fue perturbada por las noticias del hombre paseando por encima de la Luna, pero sus creencias

religiosas parecieron sufrir una reorganización interna. Sólo puedo comparar la intensidad de su experiencia con la del cambio de mentalidad que en mucha gente desencadenaron las noticias que Darwin trajo después del viaje del Beagle.

En esta época en que las puertas cerradas de nuestra imaginación son abiertas por los cuentos sobre astronautas y de exploración del espacio no sería necesario explicar el por qué de un capítulo sobre Marte en un libro que trata de Gaia. Sin embargo, quiero recordar que la hipótesis de Gaia fue un descubrimiento subrepticio directamente sugerido por el invento de un método de detección de vida planetaria que se intentaba aplicar en Marte. Aproximadamente veinte años más tarde me encontré a mí mismo intentando especular sobre la posibilidad de cambiar el ambiente físico de Marte, de manera que se convirtiese en un sistema vivo autosuficiente y en un hermano de Gaia. De modo parecido a la hipótesis de Gaia, este concepto también tuvo un origen indirecto e inesperado y emplearé los próximos párrafos para explicarlo.

La idea surgió a raíz del libro *The Greening of Mars* [El reverdecimiento de Marte] escrito con mi amigo Michael Allaby, un escritor especializado en temas ambientales. Quería un mundo para describir una nueva expansión colonial, un sitio con desafíos ambientales nuevos y libres de los problemas tribales de la Tierra. Sólo quería un planeta modelo sobre el que desarrollar juegos nuevos con Gaia, o más bien Ares, el nombre adecuado para el hermano de Gaia.

Sorprendentemente, la idea del desarrollo de una colonia en Marte ha recibido poca atención excepto por parte de los escritores de ciencia ficción. Escribimos el libro como una ficción, aunque había en él, como observó acertadamente Brian Aldiss en su revisión, de carácter informativo y propuestas serias en un marco novelesco. Escogimos este formato por la experiencia resultante de la publicación de un libro previo, uno acerca de la gran extinción de hace 65 millones de años, cuando desaparecieron los dinosaurios y una gran cantidad de la biota restante. Se escribió en forma de libro de ciencia popular, estimulado por el imaginativo trabajo científico de la familia Álvarez y sus colaboradores, que atribuyeron la extinción al

impacto de un gran asteroide. Proporcionaron lo que a nosotros nos parecieron evidencias suficientemente convincentes de semejante colisión, el descubrimiento de que el iridio y otros elementos extra-terrestres raros se encontraban significativamente en mayor abundancia en los sedimentos correspondientes a la interfase entre el Cretácico y el Terciario. Y ese es el lugar del registro geológico que marca el gran vuelco en el número y las especies de los organismos vivos.

Poco después de su publicación el libro fue criticado salvajemente por paleontólogos que escribieron en las revistas determinantes del pensamiento científico. Quizá su crítica era necesaria y el castigo justo. Como exploradores de un territorio científico no familiar deberíamos haber llevado a cabo los trámites necesarios para aprender su lenguaje y su historia, y disponer de los visados y cartas de presentación adecuadas ante los príncipes de este dominio: después de todo deberíamos haber estado preparados para los problemas que podían sobrevenir en una tierra que fue el hogar de la bestia más poderosa, el Tyrannosaurus.

Aprendimos la lección y escribimos *The Greening of Mars* en clave de ficción con la esperanza de que no sería criticado adversamente en los aspectos intrincados de detalle. Nuestro libro se presentaba como el escenario de una serie de experimentos imaginarios sobre otro planeta. ¿Qué pasaría si Marte, ahora un desierto irremediablemente vacío de vida, se convirtiese en un nido propicio para ella? ¿Cómo podríamos sembrarlo y cómo podría desarrollarse? Ninguno de nosotros pensó que iba a ser tomado como algo más que un divertimento. Tendríamos que haber sabido que todo el mundo, o casi, considera la ficción de manera mucho más seria que la realidad. Pensemos por un momento; para conocer la sociología de la Inglaterra victoriana, uno podría leer a Marx, que fue el primer científico social, pero más probablemente, incluso si uno es marxista, leería a Dickens. Al cabo de unos meses de su publicación, en 1984, nuestro segundo libro llamó mucho más la atención de lo que su redacción despreocupada parecía merecer. Se celebraron tres reuniones científicas en torno al tema de convertir Marte en un segundo hogar y en una de ellas, Robert Haynes, un distin-

guido genético de Toronto, acuñó la palabra ecopoyesis -literalmente, «la creación de un hogar»- para el proceso de transformación de un ambiente antes inhabitable en un sitio adecuado para que la vida pueda evolucionar de forma natural. Prefiero la palabra terraformación, que se utiliza a menudo cuando se considera este proceso para planetas. Ecopoyesis es más general. Terraformación tiene el aire antropocéntrico de un ajuste tecnológico a escala planetaria.

Un paso clave en el desarrollo de un sistema geofisiológico nuevo consiste en la adquisición de una actividad nueva heredable realizada por un solo organismo. Ello quiere decir que el primer acto de ecopoyesis en Marte tendría que ser realizado por un capitalista. Sería un acto oportunista llevado a cabo por un interés egoísta; el proceso comunal de la colonización vendría más tarde. Creo que Cristóbal Colón no era el presidente de un comité, pero sospecho que los que viajaron después a bordo del Mayflower sí que lo eran.

Para convertir Marte en un hogar antes tenemos que hacerlo apropiado para la vida bacteriana. En el libro proponíamos que esta acción tremenda e imposible, cambiar todo el medio ambiente de un planeta, sólo podría haber sido llevada a cabo por un capitalista con algo de mala fama, el tipo de hombre acerca del que se dice: «El nunca viola la ley pero siempre que hace algo hay que legislar para impedir que lo vuelva a hacer de nuevo». Hace falta gente como ésa para tantear las fronteras y acometer cosas que están prohibidas, cosas que aparentemente son demasiado costosas o están más allá de las posibilidades de éxito de las empresas dirigidas por las agencias estatales, bienintencionadas, pero a veces demasiado prudentes.

Por tanto la historia de *The Greening of Mars* incluía un personaje piratesco llamado Argo Brassbottom; años más tarde, el éxito le daría una caballerosidad algo esnob que le hizo cambiar el apellido a Foxe. Era un tratante de armas y tenía la idea de que podía ganar mucho dinero con la chatarra de las extensas acumulaciones de grandes y anticuados ICBM y otros misiles militares. Las cabezas nucleares podían ser, y serían, reprocesadas para convertirse en arados de plutonio o futuras espadas bajo control gubernamental

estricto. No obstante, ¿qué hacer de las carcasas llenas de combustible de los misiles? No podían ser desmontadas de manera segura pero se podían convertir, sin modificación, en los componentes clave de un programa espacial privado. Brassbottom, a través de sus múltiples contactos en los servicios civiles y militares del Este y del Oeste, pronto advirtió que sería un buen negocio disponer de estos misiles en desuso. Tenía otra idea brillante. Sus negocios principales concernían a lo que corresponde a un carroñero humano, un escarabajo pelotero que se aprovecha del vertido de residuos tóxicos y de otros productos nocivos que preferimos no mencionar. Pensó, ¿por qué no usar los misiles para enviar los residuos tóxicos fuera de la Tierra? El espacio exterior podría ser un sitio seguro de vertido.

Moviéndose como lo hacía por entre los mercados negros del mundo estaba bien informado acerca de los científicos poco escrupulosos que proporcionarían sus conocimientos a los políticos fanáticos o a los criminales por una buena paga.

Uno de ellos le comentó la angustia reciente que existía acerca del estado de la capa de ozono, lo que había dado lugar a la prohibición de los cloroilurohidrocarburos como propelentes de aerosoles. Quizás había un exceso de estos productos que requería un almacenamiento caro dentro de grandes contenedores a presión. Estos gases se encuentran entre los más inofensivos y benignos que entran en la casa. No son inflamables, no son tóxicos y no son nocivos. Únicamente fueron prohibidos porque su presencia en la atmósfera podía disminuir la capa de ozono. Brassbottom pensó: ¿por qué no enviarlo al espacio exterior y cobrar por hacerlo? No hacía mucho que otro científico había sugerido enviarlos a Marte. Los cloroilurohidrocarburos son 10.000 veces más potentes que el dióxido de carbono como gases de efecto invernadero por su capacidad de absorción de la radiación infrarroja que escapa de la Tierra. En Marte, esta propiedad podría reanimar su helada atmósfera. Brassbottom era un hombre de negocios con capacidad suficiente para emprender el desarrollo de Marte, dándose cuenta de que los beneficios de su compañía para dicho desarrollo crecerían explosivamente si el planeta alcanzase un clima templado y así se hiciera

potencialmente habitable. Como etapa final, con la ayuda de amigos en las agencias de las Naciones Unidas, convenció al nuevo Gobierno del pequeño archipiélago de New Ulster, en el océano Índico, para que participase en la construcción de un lugar de lanzamiento para sus cohetes en la isla volcánica de Crossmaglen, que se encontraba temporalmente en un estado de quiescencia. Fue anunciado o proclamado como el programa espacial del mundo subdesarrollado. Científicos serios que insisten en convertir nuestro cuento de ficción en objeto de evaluación científica me han indicado que este planteamiento no hubiera funcionado porque los gases CFC son destruidos rápidamente por la radiación ultravioleta; en su lugar se hubiera tenido que colocar tetracloruro de carbono, que no es destruido. Quizá tengan razón.

Cuando construimos mundos imaginarios en los espacios mentales, detalles demasiado prolijos como la solidez de los emplazamientos planetarios y la presencia o ausencia de una niebla ascendente o de una podredumbre seca tienden a ignorarse. Lo que importa es la postura personal y los puntos de vista generales a lo largo de paisaje inalterado. Ni yo ni Mike Allaby nos dimos cuenta de la importancia que podía darse a nuestros mundos imaginarios como propiedades inmobiliarias. Por tanto es esencial, antes de que ninguno de nosotros sea desautorizado, volver atrás y reexaminar nuestro libro como si fuese un informe y no un trabajo de ficción. Si queremos evitar, incluso en la imaginación, acusaciones de fraude también hemos de incluir un informe sobre el estado de Marte realizado por un geólogo independiente. Por derecho propio, ello tendría que haber sido la tarea de los dos Vikings, pero por desgracia sus directores estaban obsesionados por otro sueño de ficción, encontrar vida en Marte. Aquéllos tendrían que haber realizado las necesarias, aunque aburridas medidas, de la abundancia de elementos ligeros en las rocas de la superficie, la relación entre hidrógeno y deuterio en la atmósfera y la estructura de la corteza marciana. En lugar de ello, dieron prioridad a la enfebrecida e inútil búsqueda de vida.

¿Qué sabemos de Marte? El mejor y más legible resumen de la información recogida por las diversas naves que orbitaron o aterrizaron en la superficie de Marte es el libro espléndido y bellamente ilustrado de Michael Carr, *The Surface of Mars* [La superficie de Marte]. Incluye muchas fotografías tomadas desde naves orbitales. Allí se ve que Marte se parece mucho más a la Luna que a la Tierra. Cráteres de impacto salpican de viruelas toda la superficie y ofrecen una crónica bien conservada de sucesos que se remontan hasta los orígenes del planeta. Ello se encuentra en fuerte contraste con la Tierra, donde los movimientos incesantes de la corteza y la erosión por el viento y el agua mantienen la superficie siempre fresca y limpia. Marte se diferencia de la Luna en que tiene una atmósfera, por delgada que ésta sea. También tiene volcanes que son de aspecto similar a los de las islas Hawai, pero más grandes. Hay cañones y canales y cursos fluviales secos, lo que sugiere que mucho tiempo atrás había agua en circulación (véase la figura 8.I). También hay polos helados cuya extensión cambia estacionalmente. Y hay nubes y tormentas de polvo en los escasos restos de su atmósfera.

Puede que Marte parezca seco, pero ha emanado mucha agua desde el interior durante la historia del planeta. Se cree que la cantidad total se encuentra entre 12 y 25 millones de kilómetros cúbicos, lo suficiente como para proporcionar un océano de entre 80 y 160 metros de profundidad en todo el planeta si se trata de una esfera uniformemente suave, o alrededor de 200 metros para distribuciones de tierra y agua como en la Tierra.

Michael McElroy, de la Universidad de Harvard, ha deducido, a partir de datos de la composición isotópica del oxígeno en la atmósfera marciana, que ha habido una fuga pequeña de agua al espacio a pesar de la menor gravedad de Marte.



8.1. Canales de agua de la superficie de Marte. Las fotografías desde el espacio muestran la presencia de canales a lo largo de los cuales alguna vez circulaba agua al principio de la historia de Marte.

Cuando se aplican los mismos argumentos al nitrógeno se aprecia, de manera sorprendente, que Marte ha perdido una gran proporción de nitrógeno en dirección al espacio exterior. Existe suficiente evidencia de flujos de agua masivos y de caudales suficientes como para haber producido valles fluviales de cerca de 1.000 kilómetros de longitud en un pasado remoto. ¿Dónde ha ido a parar tanta agua? De acuerdo con el resumen de Michael Carr según las evidencias disponibles, la mayor parte de esta agua se encuentra ahora probablemente en forma de una capa permanentemente helada que se extiende hasta una profundidad de 1 0 2 kilómetros por debajo de la superficie. Por debajo del hielo se pueden encontrar capas de salmuera, con un punto de congelación tan bajo como $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además las zonas polares podrían encontrarse encima de cúpulas de hielo.

Este es por tanto el consenso entre los científicos acerca de Marte. Podría estar lleno de agua. Sin embargo, por diversas razones ésta sería tan inaccesible para un biota colonizante como el agua que se encuentra debajo del desierto de Australia. Además, para fundir y evaporar el agua que se encuentra debajo de la superficie se debe transferir calor desde arriba. La transferencia de calor a través de la capa superficial de polvo puede ser sorprendentemente lenta. El proceso de fusión del hielo subterráneo puede tardar millones de años. Todo lo anterior puede tomarse como una conclusión pesimista.

Frazer Fanale y sus colegas del Jet Propulsion Laboratory han propuesto que el movimiento de dióxido de carbono a través del polvo de las rocas podría ejercer un efecto de bombeo y transferir agua a la superficie. Los cambios de presión atmosférica debidos a la condensación y evaporación del dióxido de carbono son la fuerza motriz de este movimiento. Sin embargo, a escala humana el efecto ecopoyético de este mecanismo para llevar Marte al estado de siembra todavía seguiría siendo insoportablemente lento.

Antes de que tomemos la drástica decisión de vender nuestra casa aquí en la Tierra, necesitamos mucha más información sobre nuestra futura casa que la proporcionada por el informe del examen del Viking. Necesitamos saber lo peor que nos aguarda a nosotros, y al mismo Marte, como sede para una ecopoyesis.

Si miramos de nuevo a la superficie marciana de tipo lunar veremos que los canales y los sistemas fluviales que sugieren tan intensamente la presencia de agua, son realmente antiguos. Datan de casi 3,5 eones, cuando los impactos de los asteroides eran más frecuentes. Marte puede haber tenido un efecto invernadero atmosférico más importante y un clima más cálido, al que también puede haber contribuido el calor de los impactos. Hace 4 eones el Sol era casi un 25 por ciento menos luminoso que ahora. Si Marte está congelado ahora entonces hubiera sido necesaria una manta gruesa para mantener una atmósfera y agua corriente. Desde aquellos lejanos tiempos, se ha calentado el Sol y ha habido otros impactos de grandes asteroides, aunque menos frecuentes que en los primeros días. A pesar de ello no hay huella de corrientes de agua visible. El

conocimiento convencional actual que supone la existencia de un océano de agua helada de 100 metros de grosor podría ser erróneo.

Tampoco se ha tenido en cuenta la probabilidad de que Marte, como la Tierra, fuese originalmente rico en productos químicos que reaccionasen con agua para formar hidrógeno que pudiese liberarse al espacio. El agua puede haber estado allí alguna vez, pero la fuga de hidrógeno dejó tras sí oxígeno, no en forma de oxígeno libre, sino ligado químicamente en forma de nitritos, sulfatos y óxidos de hierro.

Consideremos el estado de Marte hace 3,5 eones. Esto sería después de que los asteroides habían llovido de manera tan inmoderada que habían convertido en roca y polvo la entera superficie planetaria hasta una profundidad de por lo menos 2 kilómetros, un proceso que los planetólogos tímidamente llaman «ajardinamiento». En aquel tiempo la Tierra era reductora, el medio ambiente era rico en aquellos compuestos de hierro y azufre que tienen una capacidad considerable de reaccionar con el oxígeno. No hay razón para creer que Marte era diferente. Además, aquellas rocas primitivas tenían una capacidad considerable para reaccionar con el dióxido de carbono. Una capa de 2 kilómetros de roca desmembrada a partir de basalto básico tiene la capacidad de reaccionar con unos 600 metros de agua y dióxido de carbono (3 bars) lo suficiente para hacer la presión atmosférica superficial de Marte tres veces mayor que la de la Tierra actual. ¿Puede ello justificar la fina atmósfera y la aridez del Marte de la actualidad? El agua abundante que fluyó hace 3,5 eones podría haber reaccionado con el ión ferroso del polvo de las rocas, liberando el hidrógeno que llevaba, que podía escapar así al espacio. Se podría pensar que estas reacciones gas-sólido erosivas eran demasiado lentas como para eliminar demasiado oxígeno y dióxido de carbono. Ello puede ser cierto en las condiciones presentes de Marte, pero si había agua corriente una gran parte del ión ferroso y de los sulfuros pueden haberse disuelto en ella, o dispersarse como una suspensión ligera, acelerando tanto las mismas reacciones como el proceso de descomposición de las rocas. El estado oxidante del Marte actual, que da al planeta su color rojo, podría consistir únicamente en una capa superficial. Sin em-

bargo, hasta que vaya allí otro geólogo como el Viking y examine las rocas en profundidad no podremos estar seguros de que haya atmósfera y agua que nos esperen.

Vale la pena que recordemos cómo evitó la Tierra el mismo destino y por qué ahora no estamos resecos. El dióxido de carbono que había inicialmente en la atmósfera desapareció casi en su totalidad para formar piedras calizas y otras rocas sedimentarias calcáreas. Se habían oxidado grandes cantidades de sulfuros e ión ferroso y el oxígeno retenido en este proceso podría haber estado asociado originalmente con hidrógeno formando agua. La Tierra fue salvada de la desertización por su abundancia de agua y por la presencia de Gaia, que actuó para conservarla. Marte había perdido pronto su limitada cantidad de agua primordial y esa puede ser la razón por la cual los canales son tan antiguos y de por qué tenemos pocas evidencias de agua de origen reciente. Marte podría ser irremediablemente árido y la poca cantidad de agua que ha quedado podría encontrarse en acuíferos por debajo de la superficie, tan salados y tan amargos como el Mar Muerto. Para la mayoría de organismos vivos la salmuera saturada es difícilmente mejor que la ausencia de agua.

Tengo que confesar ya la intuición personal de que Marte se encuentra cercano a un estado de aridez. No me es fácil imaginármelo como una belleza planetaria lustrosa, congelada y durmiente a la espera de un aliento de vida soplado desde la Tierra. Sin embargo, los cuentos de hadas son mucho más entretenidos que las visiones de un Marte seco y lleno de polvo. Por tanto, aceptemos el consenso científico actual que predice agua y dióxido de carbono abundantes en espera de ser descongelados, y usemos este modelo agradable como inspiración para nuestros colonos ecopoyéticos. Sólo queda por considerar la cuestión de cómo nos desplazamos y cómo deberíamos preparar el jardín para plantar.

Si visitásemos Marte en una tarde de verano soleada en latitudes correspondientes a las de Buenos Aires o Melbourne estaríamos sorprendidos de lo cálido del clima. Durante el día las temperaturas pueden llegar hasta 20 °C. Si el aire fuese respirable haría una temperatura para llevar camiseta de manga larga. Sin embargo, otros

días puede encontrarse bajo cero. Y siempre que anochece la temperatura cae muy rápidamente, para alcanzar $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a medianoche. Lo suficiente para que el dióxido de carbono forme una escarcha de hielo seco en el fondo de los valles o depresiones.

Bajo nuestros pies, el suelo se parecería a un desierto de la Tierra. Pero sólo es una ilusión, pues muy pocos desiertos de la Tierra están vacíos de vida. Casi en todos los desiertos terrestres existe un suelo formado por una cubierta fina de bacterias. No hay suelo en Marte, sólo una mezcla sin vida de rocas de todos los tamaños, desde polvo hasta cantos rodados, que se ha denominado de manera casi onomatopéyica con el nombre seco y duro de regolito (que se muestra en la figura 8.2).

Marte no está preparado para la vida, no sólo es inhabitable para cualquier forma de vida sino que también es venenoso y destructivo para la materia orgánica. El aire en la superficie de Marte está en el mismo estado químico que el de la estratosfera de la Tierra. Si el aire estratosférico que se encuentra a 16 kilómetros por encima de nuestras cabezas se comprimiase sin cambiar su composición nosotros no podríamos respirarlo. El ozono se encuentra allí en concentraciones de 5 partes por millón. El ozono nos puede proteger de la radiación solar ultravioleta, pero a esta concentración se respira de manera dificultosa y es letal en poco tiempo. La superficie de Marte, expuesta a semejante atmósfera, durante toda la edad del planeta, es rica en compuestos químicos exóticos, como el ácido pernitrico, que rápidamente destruye semillas, bacterias, o incluso toda materia orgánica. Marte no es un sitio para la jardinería.

La superficie altamente oxidada del Marte de hoy significa que la vida no puede desarrollarse en ella. De manera distinta al Arcaico en la Tierra, los precursores orgánicos de la materia viva no tendrían la oportunidad de acumularse y reunirse. Para nosotros, el único camino para la ecopoyesis es, en primer lugar, cambiar el medio ambiente hasta que sea adecuado para la vida y después dejarlo evolucionar espontáneamente o sembrar el planeta. Si conseguimos la maduración ambiental de Marte no puedo creer que tuviésemos la paciencia de dejar que allá se desarrollase vida por su cuenta. Alguien lo sembraría, aunque sólo fuese por accidente.

La vida planetaria necesita de un sistema operativo como Gaia; en caso contrario, es vulnerable a cualquier alteración en su ambiente que pueda ocurrir como consecuencia de su propia evolución o de un desastre exterior como los impactos demasiado frecuentes de asteroides. No creo que sea viable la vida disgregada en unos pocos oasis del planeta. Un sistema como éste es incompleto, incapaz de controlar su medio ambiente e impotente para resistir cualquier cambio adverso. Incluso si rociamos cada trozo de la superficie del planeta con cada especie de microorganismo ello no llevaría a la vida. Algunos organismos pueden sobrevivir e incluso crecer durante un tiempo breve, pero no habría invasión, no habría infección diseminándose rápidamente como la vida que tomase posesión y controlase el planeta. Creo que es inmoral que una organización a veces tan capaz como la NASA se esforzase tan duramente en esterilizar su nave espacial cuando es bien conocido que el mismo Marte es un gran esterilizador. También es conocido que si la misma nave aterriza sin esterilizar en el terreno mucho más hospitalario de los polos helados antárticos o el desierto de Australia, su pequeño complemento de pasajeros microbianos no tendría posibilidad de establecer allí un hogar permanente.



8.2. Regolito visto desde el módulo de aterrizaje del Viking. Marte no tiene suelo -el suelo es la estructura activa de un planeta vivo,

el regolito son los escombros esparcidos en la superficie de un planeta muerto.

Hay partes de Marte que pueden tener una temperatura amable en tardes soleadas, pero ello no significa que los esfuerzos necesarios para despertarlo a la vida sean pocos. Cuando empezó la vida en la Tierra, el calor recibido desde el Sol era del orden del 60 por ciento superior del que ahora está calentando Marte. En la Tierra había agua abundante y una atmósfera suficientemente densa como para proporcionar un clima confortable. El único aspecto a favor de Marte es que es más oscuro que la Tierra y absorbe una cantidad superior de la luz solar que le llega. Sin embargo, esta ventaja sólo vale para el estado actual, pues una vez que se libere el agua ésta se evaporará para formar nubes y una cubierta de nieve.

Ello incrementará el albedo de Marte de manera que reflejará al espacio el calor que hubiera podido ganar en la situación anterior. Puede que Marte nunca sea capaz de proporcionar las condiciones requeridas para empezar y sostener la vida, ni tan siquiera dentro de 1.000 millones de años más cuando el Sol esté mucho más caliente y todo lo que quede de aire marciano y agua se libere a la atmósfera.

Entonces, ¿qué podríamos hacer para iniciar a Marte en la carrera evolutiva que finalmente le llevaría a unas condiciones parecidas a las de la Tierra actual y así convertirse en nuestro segundo hogar? En primer lugar, el medio ambiente marciano tiene que cambiar lo suficiente para permitir el crecimiento espontáneo y la diseminación de microorganismos a lo largo de una gran proporción de superficie planetaria. A simple vista, la noción de ingeniería planetaria, la ecopoyesis de un planeta, parece una gran desfachatez. Sin embargo no es tan descabellada si Marte es un planeta congelado que sólo necesita ser descongelado. Esta es la opinión generalmente aceptada entre los científicos, que indican que cantidades de hasta dos atmósferas de presión de dióxido de carbono, y agua suficiente para cubrir el planeta hasta una profundidad de aproximadamente 100 metros, se han evaporado desde su interior durante los

4 eones pasados. Si se acepta esta conclusión entonces debemos pensar en Marte como en algo en equilibrio sobre el vértice de un acantilado de estabilidad ambiental. Un empujón pequeño puede ser suficiente para cambiarlo a un estado mucho más adecuado para la vida.

En su libro sobre Marte, Michael Carr considera la posibilidad de que exista agua líquida en los acuíferos bajo la superficie del planeta y también la probabilidad de que esta agua sea salada. Se olvida a menudo que la forma estable del nitrógeno es en forma de ión nitrato, disuelto en agua. En la Tierra, el nitrato se forma de manera continua mediante procesos de alta energía (incendios, rayos y radiación nuclear) en la atmósfera. Este llega rápidamente al suelo mediante la lluvia y el biota lo devuelve rápidamente a la atmósfera en forma de gas nitrógeno. No hay vida en Marte, y yo me he preguntado muchas veces si la mayor parte del nitrógeno está allí en forma de nitrato disuelto en las salmueras. O quizás hay amplios depósitos de sal, lechos evaporíticos, dejados allí después que los antiguos cursos de agua se hayan secado. El nitrato y el nitrito atrapados en estos depósitos también podrían ser la causa de la relativa falta de nitrógeno en la atmósfera marciana presente.

Haría falta otro Viking para responder a estas preguntas y por ahora sólo podemos especular acerca de los cambios que tendrían que ocurrir para convertir el infértil Marte del momento presente en un vivero para la vida planetaria. Este es el motivo por el que con Mike Allaby decidimos escribir nuestro cuento acerca de la ecopoyesis marciana como una ficción, y calentar Marte enviando un suplemento de CFC desde la Tierra. Tengo mis dudas acerca de si se podrían enviar cantidades suficientes de estos gases de potente efecto invernadero. El objeto de esta idea era estimular la imaginación de los que pudiesen querer transformar Marte por otros medios que no fuesen una propuesta seria de ingeniería. A menudo me he encontrado en mi experiencia como inventor que una invención ligeramente errónea o incompleta es más atractiva para los ingenieros que una que es un *fait accompli*. En cualquier caso parece ambicioso intentar llevar a cabo una parte mayor de la que es compe-

tencia de uno en un proyecto, apartar a los demás de la posibilidad de ejercer sus técnicas especiales y habilidades artísticas.

En lugar de enviar CFC a Marte de manera costosa por transporte espacial, tal como se proponía en nuestro libro, alguien puede diseñar una planta automática para fabricarlos en el mismo Marte a partir de materiales autóctonos. Si existen salmueras marcianas y se les puede explotar, la síntesis de fluorohidrocarburos y otros gases de efecto invernadero potencial, como el tetracloruro de carbono, no debería suponer un gran problema mediante la utilización de las sales de las salmueras y el dióxido de carbono atmosférico como materiales de partida. Haría falta una planta de energía nuclear de mediana potencia. Quizá los ecologistas estarían encantados de ver una enviada a Marte en lugar de instalada aquí en la Tierra. Si se encuentran nitrato y nitrito en las salmueras, entonces éstos podrían proporcionar una fuente local interesante tanto de oxígeno como de nitrógeno. No sólo para cambiar la atmósfera, sino también en cantidad suficiente para que lo respirasen los primeros exploradores y técnicos en sus hábitats restringidos.

Hemos propuesto el calentamiento de Marte mediante el envío de gases de efecto invernadero, pero ¿funcionaría? El mecanismo básico del efecto invernadero parece muy simple pero el cálculo del incremento de temperatura correspondiente a un incremento determinado de dióxido de carbono está muy lejos de ser sencillo. Hay que tener en cuenta muchos otros aspectos a escala planetaria, incluyendo la reflexión de la luz solar por las nubes y la corteza de hielo, el transporte de calor por los movimientos del aire y por la evaporación y condensación de agua, y la estructura del océano y la atmósfera.

No es de extrañar que estos cálculos requieran la ayuda de los mayores ordenadores que se puedan utilizar, e incluso éstos son inadecuados. Por lo que sé hasta ahora, no existen modelos en los que se haya incluido la retroalimentación dinámica con el biota. El efecto de invernadero marciano probablemente será mucho más fácil de calcular -o por lo menos en los primeros estadios, antes de que se evapore mucha agua para introducir nubosidad, cubierta de nubes y vapor de agua-. Tanto las nubes como el hielo son blancos

y reflejan la luz del Sol. Generalmente hablando, el hielo tiene el efecto opuesto al dióxido de carbono y causa enfriamiento, las nubes pueden o bien calentar o enfriar según su forma y altitud. Para complicar el problema todavía más, el vapor de agua absorbe en el infrarrojo, y su presencia amplifica el efecto de calentamiento del dióxido de carbono.

La idea del calentamiento de Marte por introducción de CFC en la atmósfera se apoya en una serie de coincidencias favorables. En primer lugar, hay una ventana rota en el invernadero. A longitudes de onda infrarroja entre 8 y 14 micrómetros ni el dióxido de carbono ni el vapor de agua absorben de manera efectiva. Una cantidad importante de calor se irradia al espacio desde la superficie planetaria y la atmósfera a estas longitudes de onda. Los CFC absorben intensamente en esta región y sirven como una nueva ventana de cristal, transparentes todavía a la luz del Sol pero opacos a lo que previamente era una brecha en el infrarrojo. En segundo lugar, los gases de efecto invernadero amplifican mutuamente sus efectos. Algo que no es conocido fuera del mundo de la meteorología es el hecho de que el efecto invernadero del dióxido de carbono depende principalmente de la absorción infrarroja por vapor de agua. El dióxido de carbono absorbe la radiación infrarroja, pero no a la misma longitud de onda o tan fuertemente como el vapor de agua. Un incremento de dióxido de carbono producirá algún calentamiento y éste a su vez incrementará el contenido en vapor de agua del aire. El vapor de agua incrementado aumenta a su vez el calentamiento y así se amplifica el pequeño efecto del dióxido de carbono. En Marte habría una amplificación doble. Los CFC calentarían un poco la superficie, lo que aumentaría la concentración de dióxido de carbono y así se incrementaría el calentamiento, que a su vez evaporaría agua y calentaría todavía más el planeta. Es por esto por lo que puede ser posible, mediante la utilización de una cantidad manejable de estos extraños productos químicos, cambiar el clima del planeta entero. No podemos avanzar, hasta que se elabore el modelo, la cantidad de CFC necesaria. Puede ser tan limitada como 10.000 toneladas, o ser de más de un millón de toneladas. Si es tan grande como la última la iniciativa de Brassbottom no

tendría éxito. Sin embargo, estaría dentro de la capacidad de una planta química automática enviada a Marte con el propósito de sintetizar éstos u otros gases de efecto invernadero a partir de materiales autóctonos.

El éxito o fracaso de la ecopoyesis para Marte es probable que dependa de cuánto dióxido de carbono y cuánta agua se encuentra disponible. Con una atmósfera de dióxido de carbono densa, 2 bars o más, es probable conseguir un clima tolerable. Con menos dióxido de carbono, una gran parte dependerá de la distribución de agua y del efecto de la nieve y las nubes en el albedo planetario. En otros relatos de ficción científica se transporta agua a Marte en forma de asteroides de hielo que se toman de sus heladas órbitas muy alejadas del Sol. Un cálculo simple muestra la imposibilidad de esta idea si no se dispone de una energía motriz nueva e increíble. Se necesita un asteroide de hielo puro, de 300 kilómetros de diámetro, para igualar la cantidad de agua que se piensa que hay en Marte ahora. Muy pocos estarían preparados para establecer un contrato con el objetivo de desplazarlo hasta allí.

Cuando los CFC hayan hecho su trabajo de generar una atmósfera a partir de la superficie previamente helada, ¿qué habría que hacer? Asumamos, en un principio, que tenemos un planeta con una atmósfera de entre 0,5 y 2 bars de presión, compuesta casi enteramente de dióxido de carbono. El clima todavía es frío con respecto a los parámetros terrestres pero las fluctuaciones diurnas son menos extremas. A latitudes bajas, en las regiones tropicales, las noches con escarcha ya no son tan frecuentes ni intensas. Y lo que es todavía más importante, se ha evaporado una cantidad de agua suficiente para que haya precipitaciones en algunas regiones. La superficie todavía es regolito, pero ya no es altamente oxidante, el ácido pernítrico letal y otros oxidantes de la atmósfera se han desplazado hacia las zonas superiores de la misma, a las mismas regiones de gran altura donde se encuentran en la Tierra.

Sólo puedo imaginar un ecosistema capaz de sobrevivir en semejante medio ambiente. Sería poco realista incluir las plantas y los animales, por lo menos inicialmente. La primera forma de vida de

la Tierra consistió en microorganismos procariotas, y sus descendientes todavía florecen en el suelo.

Nuestro primer objetivo sería introducir un ecosistema microbiano que pudiera convertir el regolito en suelo y que al mismo tiempo incluyese bacterias fotosintéticas habitantes de la superficie. Estas proporcionarían la comida, energía y materias primas para el grueso del ecosistema que habitaría por debajo de la superficie. Si se pudiera conseguir que los fotosintetizadores fueran de color oscuro podrían absorber el calor del Sol y estar más calientes que sus alrededores. A escala local es como la ventaja que tenían las margaritas oscuras en el mundo de las margaritas; esto podría favorecer que el ecosistema del que forman parte se diseminara a través de la superficie de Marte. Si ello ocurriese el clima tendería hacia la homeostasis, primero regionalmente y luego a escala global.

Existen otros caminos para la regulación del clima por parte del biota además del control del albedo. Probablemente es más importante la regulación basada en el control de los gases atmosféricos. El primer acto de ecopoyesis sería provocar un efecto invernadero artificial a partir de gases CFC que se encontrarían a la concentración de una parte por 1.000 millones en el aire. En la vida temprana de Ares, el control de las emisiones de CFC todavía estaría en manos de los colonos humanos. Ello puede ser especialmente importante si se reduce el dióxido de carbono de manera significativa o si la nieve o la cubierta de nubes incrementan el albedo planetario. Existen dos métodos por los que el dióxido de carbono podría ser eliminado en cantidades importantes. El primero está relacionado con el hecho de que la vida sea tan eficaz en su propagación que escinda grandes cantidades de gas en materia orgánica carbonosa y oxígeno libre. El segundo es por reacción del dióxido de carbono con las rocas de silicato cálcico para formar carbonatos y ácido silícico. Las primeras reacciones liberarían oxígeno que podría acumularse en el aire. Podría ocurrir que las rocas del regolito y el agua de las salmueras marcianas contuvieran una cantidad de material suficiente, como el hierro elemental y su forma ferrosa, para la eliminación del oxígeno. En cualquier caso, el primer oxígeno que apareciese en la atmósfera estaría demasiado diluido como para

poder reoxidar fácilmente el exceso de materia orgánica producida por la fotosíntesis. El exceso de carbono proveniente de los fotosintetizadores muertos sería reoxidado por otros organismos del ecosistema bacteriano que utilizarían sulfato y nitrato del regolito como oxidante. Ello devolvería dióxido de carbono, nitrógeno y óxido nitroso al aire. Sin embargo, antes de que pasase mucho tiempo el suelo de Marte tendería hacia un estado en el que la cantidad de oxidantes proveniente de recursos no renovables sería insuficiente para mantener la reoxidación de la materia carbonosa y el retorno de dióxido de carbono al aire. Cuando se llegó a este punto en la Tierra primitiva, en el Arcaico, se abrió para su explotación una gigantesca fuente de materia orgánica suplementaria. Creo que fue entonces cuando evolucionaron los metanógenos para aprovechar de forma oportunista la ventaja de este regalo de los fotosintetizadores. Los metanógenos convertían la materia orgánica en una mezcla de metano y dióxido de carbono. El metano también es un gas con efecto invernadero que permite evitar el posible enfriamiento desastroso que hubiera podido ocurrir por falta de dióxido de carbono.

En esta breve discusión ya se ha planteado la necesidad de fotosintetizadores, reductores de sulfato y nitrato, y de metanógenos. Todos ellos son habitantes habituales en cualquier muestra de suelo tomada en prácticamente cualquier sitio de la Tierra. Los ecosistemas aeróbicos y anaeróbicos coexisten pacíficamente con sus territorios respectivos distribuidos con arreglo a una verticalidad donde los organismos que toleran el oxígeno se encuentran en la superficie y los anaerobios en los puntos más bajos del suelo. El suelo es un conjunto complejo e intrincado, y diverso en la población de especies que contiene. El establecimiento afortunado del ecosistema bacteriano del suelo en el regolito marciano no es un asunto que dependa de la búsqueda, o la creación por ingeniería genética, de especies que puedan crecer allí, sólo se trata de desplazar Marte a un estado en que los ecosistemas microbianos de la Tierra puedan florecer y transformar el regolito del suelo. Sin embargo, esto sólo es el principio; para que Marte se convierta en un sistema autosuficiente es necesario que los organismos y su medio ambiente se

acoplen de manera tan estrecha como lo están en la Tierra. La adquisición del control planetario sólo puede venir del desarrollo conjunto de la vida y su medio ambiente hasta formar un sistema único e indivisible.

Una familia no hace un pueblo, todavía menos constituye una ciudad con infraestructura autosuficiente. Del mismo modo es necesaria una cierta masa crítica del biota para la homeostasis planetaria; el tamaño de la misma va a depender principalmente de la cantidad de esfuerzos necesaria para mantener la homeostasis y el tamaño de las perturbaciones probables.

Los modelos simples, derivados del mundo de las margaritas, sugieren que un sistema estable requiere como mínimo el recubrimiento del 20 por ciento de la superficie planetaria para poder resistir las perturbaciones más frecuentes. Estas consistirían en cambios de la intensidad solar, impactos de asteroides, desarreglos internos debidos a la evolución de especies que afectan al medio ambiente de manera adversa, o el agotamiento de algún recurso esencial. Si Ares tiene que crecer y ser fuerte necesitará cubrir más que unos pocos oasis en el desierto marciano.

En las novelas románticas la parte culminante suele ser la boda. Ello es magnífico para el entretenimiento pero no sirve de guía para una feliz vida de casado. Algo parecido ocurre con la ecopoyesis. La conversión física y química de Marte representaría un enorme logro de la ingeniería, una tarea grande y sufrida. Por el contrario, el cuidado de la vida planetaria infantil, aunque satisfactoria, representaría un anticlímax. Se necesitaría una gran paciencia y cariño para la tarea abnegada de dar alimento y guiar diariamente a la vida planetaria recién nacida hasta que pudiese mantener la homeostasis por sí misma.

Los pensamientos acerca de Gaia siempre estarán ligados con la exploración del espacio y Marte porque en cierto sentido Marte fue su lugar de nacimiento. Rusty Schweickart y sus compañeros astronautas han compartido con nosotros su revelación al mirar atrás hacia la Tierra desde la distancia de la Luna, y darse cuenta de que se trataba de su hogar. En menor grado, aunque significativo, nues-

tra contemplación indirecta de los planetas del sistema solar vistos a través de los ojos espléndidos del Voyager y otras naves espaciales ha impactado en nuestras mentes y abierto las puertas cerradas de las ciencias de la Tierra.

Lord Young, famoso por su trabajo en favor de la fundación de la Universidad Abierta del Reino Unido ha estado tan interesado con la idea de llevar vida a Marte que ha fundado el club de los Argo Venturers con la idea de pensar y actuar hacia este fin. Cree que el proyecto de colonizar Marte, incluso antes que, o sin, su realización final, es una poderosa fuente de inspiración. Comparto su punto de vista y creo que la consideración de las grandes dificultades de llevar Ares a la vida nos puede ayudar a entender las horrorosas consecuencias de un daño tan considerable a Gaia que tengamos que tomar la responsabilidad incesante de mantener la Tierra como un sitio adecuado para la vida, un servicio que por ahora nos es dado sin coste alguno.

11

DIOS Y GAIA

Canto a Gaia, madre de todas las cosas, la antigua, firmemente asentada en sus fundamentos, que nutre todo cuanto hay de vivo en la tierra; lo que camina sobre el suelo y lo que avanza por el mar o vuela por el aire. Todo vive, oh Gaia, por ti; de ti reciben los hombre sus hijos y los frutos tan hermosos; en ti está el dar vida y tomarla a los hombres mortales...

Himno homérico XXX

Las fotografías, como las biografías, a menudo revelan más acerca del artista que sobre el tema de que tratan. Quizás es por ello por lo que las fotografías de pasaporte, tomadas de manera automática en cabinas automáticas, parecen tan faltas de vida. ¿Cómo podría una simple máquina captar el alma de un individuo, sentado rígidamente y mirando fijamente al ojo ciego de la cámara? Intentando escribir acerca de Dios y Gaia comparto alguna de las limitaciones de una cámara mecánica, y sé que este capítulo mostrará más de mí mismo que de mis temas. Entonces, ¿por qué intentarlo?

Cuando escribí el primer libro sobre Gaia no tenía la menor idea de que sería tomado como un libro religioso. Aunque pensé que el tema era fundamentalmente científico, no hay duda de que muchos otros lectores opinaron de otra manera. Dos terceras partes de las cartas recibidas, y que todavía se reciben, trataban del significado de Gaia en el contexto religioso. Este interés no sólo se ha circunscrito al estado seglar; una de las cartas más interesantes provino de Hugh Montefiore, entonces obispo de Birmingham. Me preguntaba qué es lo que creía yo que había aparecido antes, la vida o Gaia. Mis intentos de contestar a esta pregunta me llevaron a mantener correspondencia con él, que se expone en un capítulo de su libro

The Probability of God [La probabilidad de Dios]. Sospecho que algunos cosmólogos también reciben preguntas semejantes por parte de los que se imaginan que casi se saludan con Dios. Fui ingenuo al pensar que un libro sobre Gaia sólo sería tomado como algo científico.

Entonces, ¿qué pienso acerca de la religión? Cuando era estudiante, un cuáquero practicante me preguntó seriamente si alguna vez había tenido alguna experiencia religiosa. No comprendiendo lo que me preguntaba pensé que se refería a una aparición o un milagro y le dije que no. Mirando atrás desde una perspectiva de 45 años me inclino a pensar que habría tenido que decir que sí. La vida misma es una experiencia religiosa. Sin embargo, en aquella ocasión la pregunta casi no tenía sentido porque implicaba la separación de la vida entre una parte sagrada y otra secular. Ahora creo que no puede haber tal división. En cualquier relación, en el plano de la satisfacción personal, hay momentos de deleite y de dificultad. Para mí, un punto álgido fue cuando Jim Morton, el deán de la catedral de St. John, en Nueva York, me pidió que le ayudase en una celebración religiosa. Todavía recuerdo maravillado cómo formé parte de aquella procesión llena de color, junto a él y otros clérigos, vestidos con ropas medievales. La música del coro cantando *Morning Is Broken* me parecía que adquiría un sentido nuevo en el ambiente de aquel sitio sagrado. Fue una experiencia sensual que no por ello me pareció menos religiosa.

Mis ideas sobre la religión cuando era niño se desarrollaron a partir de las de mi padre y de la gente del campo que conocí. Consistían en una mezcla rara, compuesta de brujas, tabúes, y los puntos de vista expresados por los cuáqueros en una escuela de domingo de las afueras, en la casa de reunión de los amigos. La Navidad era una fiesta de solsticio más pagana que cristiana. Como familia, éramos, bien adentrados este siglo, sorprendentemente supersticiosos. Tenía tan inculcados mis conocimientos infantiles acerca del poder de lo oculto que de mayor tuve que hacer un esfuerzo de voluntad para parar de tocar madera o cruzar mis dedos cada vez que tenía que enfrentarme a un riesgo. El cristianismo se encontraba

allí no tanto como una fe sino como una serie de guías a seguir acerca de cómo ser bueno.

Cuando contemplé Gaia por primera vez en mi imaginación sentí lo que debe haber sentido un astronauta cuando estaba de pie en la Luna, mirando atrás hacia nuestro hogar, la Tierra. El sentimiento de la fuerza con que teoría y evidencia se unen para confirmar la idea de que la Tierra puede ser un organismo vivo. Pensar que la Tierra es algo vivo hace que todo parezca estar, en los días felices, en su sitio, como si el planeta entero celebrase una ceremonia sagrada. Estar en la Tierra conlleva aquel mismo sentimiento especial de bienestar que se encuentra asociado a la celebración de cualquier religión cuando es lo justo y cuando uno está abierto a la aceptación. No es necesario interrumpir el juicio crítico, y ello no impide cantar el himno equivocado o el correcto fuera de tono.

Esto es todo lo que siento acerca de Gaia. ¿Qué siento acerca de Dios? Estoy demasiado implicado en el raciocinio científico para sentirme a gusto recitando el credo o el padrenuestro en una iglesia cristiana. La insistencia en la declaración «creo en Dios Padre todopoderoso, creador de los cielos y la Tierra» parece adormecer el sentido de la maravilla, como si uno estuviera comprometido con una línea de pensamiento por un contrato legal cósmico. También parece equivocado tomarlo sólo como una metáfora. Sin embargo, respeto la intuición de los que creen, y me conmueve la ceremonia, la música, y sobre todo la gloria de las palabras del libro de plegarias que para mí están lo más cerca posible de la perfecta expresión de nuestro lenguaje.

He mantenido apartadas mis dudas durante mucho tiempo. Ahora que escribo este capítulo tengo que intentar explicar de alguna manera, a mí mismo y al lector, cuáles son mis creencias religiosas. Me satisface la idea de que el universo tiene propiedades que hacen la emergencia de la vida y Gaia algo inevitable. Sin embargo, no estoy de acuerdo con la afirmación de que fue creado con este propósito. Puede haber sido así, pero cómo empezaron la vida y el universo son cuestiones inefables. Cuando un colega científico utiliza datos de la Tierra de hace eones para explicar su teoría de los orígenes de la vida genera una sombra de duda similar. ¿Cómo es

posible tratar como si fueran hechos de la ciencia sucesos que ocurrieron hace tantos años y que dieron lugar a la emergencia de algo tan intrincado como la vida? Es consustancial con el ser humano tener curiosidad por los antecedentes, pero realizar expediciones dentro del pasado remoto a la búsqueda de los orígenes es tan extraordinariamente poco relevante como lo era la caza de las serpientes de mar. La mayor parte de la información acerca de los orígenes está con nosotros aquí y ahora. Así pues, recreémonos en ella y sintámonos agradecidos de estar vivos.

En una reunión reciente en Londres, un hombre juicioso, el doctor Donald Braben, me preguntó: «¿Por qué se para usted en la Tierra? ¿Por qué no considera si el sistema solar, la galaxia o el universo están vivos?». Mi respuesta instantánea fue que el concepto de una Tierra viviente es manejable. Sabemos que no hay más vida en el sistema solar y que la estrella más cercana está extremadamente lejos. Tiene que haber otras Gaias orbitando alrededor de otras estrellas tranquilas de larga vida pero, aunque pueda sentir curiosidad por ellas y por el universo, estos son conceptos intangibles: son para el intelecto, no para los sentidos. Hasta que no seamos visitados desde otras partes del universo, si es que ello ocurre alguna vez, estamos obligados a permanecer separados.

Sospecho que muchos han transitado por la misma línea de pensamiento. Todos estos millones de cristianos que destinan un lugar especial de su corazón para la Virgen María posiblemente contestarían como yo lo hago. El concepto de Yahvé como ser remoto, todopoderoso y que lo abarca todo, es o bien terrorífico o bien inalcanzable. Incluso el sentido de la presencia de un Dios más contemporáneo, una voz pequeña en el interior, puede no ser suficiente para los que necesitan comunicarse con alguien exterior. María está cerca y se le puede hablar. Ella es creíble y manejable. Podría ser que la importancia de la Virgen María en la fe tuviera algo que ver con este concepto, pero también puede incluir otras cosas. ¿Qué ocurre si María es un nombre alternativo para Gaia? Entonces su capacidad de dar a luz virginalmente no sería un milagro ni una aberración partenogenética, se trata del papel de Gaia desde que empezó la vida. Los inmortales no tienen necesidad de reproducir

una imagen de sí mismos, es suficiente con que renueven continuamente la vida que los constituye. Cualquier organismo vivo de una edad semejante a la de un cuarto de la del mismo universo y que todavía se encuentra lleno de vigor está tan cercano de la inmortalidad como nosotros nunca tendremos necesidad de saber. Ella es de este universo y, concebiblemente, una parte de Dios. En la Tierra ella es la fuente de vida inagotable y todavía está viva, ella dio a luz a la humanidad y nosotros somos una parte de ella.

Por todo esto es por lo que, para mí, Gaia es un concepto religioso y científico a la vez, y es manejable en ambas esferas. La teología también es una ciencia, pero si tiene que trabajar con las mismas reglas que el resto de las ciencias entonces no hay sitio para las creencias o el dogma. Con ello quiero decir que la teología no tendría que dar por sentado que Dios existe y luego continuar con el estudio de su naturaleza y sus interacciones con el universo y los organismos vivos. Semejante aproximación es prescriptiva, presupone su existencia, y cierra el pensamiento a preguntas tales como: ¿Cómo sería el universo sin Dios? ¿Cómo podemos utilizar el concepto de Dios como una manera de contemplar el universo y a nosotros mismos? ¿Cómo podemos utilizar el concepto de Gaia como un sistema para entender a Dios? El creer en Dios es un acto de fe y permanecerá así, Del mismo modo, huelga intentar probar que Gaia está vivo.

En su lugar, Gaia tendría que ser un modo de ver el mundo, a nosotros mismos y a nuestra relación con los seres vivientes.

La vida de un científico que es un filósofo de la naturaleza puede ser profundamente religiosa. La curiosidad es una parte del proceso íntimo del amor. Ser curioso y conocer el mundo natural da lugar a una relación amorosa con él. Puede ser tan profunda que no pueda articularse pero se trata sin lugar a dudas de buena ciencia. Los científicos creativos, cuando se les pregunta cómo llegaron a un gran descubrimiento, frecuentemente dicen: «Lo sabía intuitivamente pero costó varios años de trabajo demostrárselo a mis colegas». Comparemos esta idea con la de William James, el filósofo y psicólogo del siglo XIX, en *Las variedades de la experiencia religiosa*:

«La verdad es que en la esfera metafísica y religiosa, las razones articuladas sólo son conocidas para nosotros cuando nuestros sentimientos inarticulados de la realidad ya han sido impresionados en favor de la misma conclusión. Entonces, nuestra intuición y nuestra razón trabajan ciertamente juntos y se pueden desarrollar grandes sistemas del mundo, como la filosofía budista o la católica. Nuestra creencia impulsiva siempre está presente, es lo que establece el cuerpo original de la verdad, y nuestra filosofía articulada verbalmente no es más que una mera traducción en fórmulas. La certeza inmediata y no racionalizada es lo que se encuentra profundamente en nuestro interior, el argumento razonado no es más que una exhibición superficial. El instinto guía, la inteligencia fundamentalmente sigue».

Este era el modo de pensar de los filósofos de la naturaleza en los tiempos de James Hutton en el siglo XVIII y es todavía el de muchos científicos de hoy en día. La ciencia puede abarcar el concepto de la Tierra como un superorganismo y todavía puede preguntarse acerca del sentido del universo.

¿Cómo hemos llegado a nuestro presente mundo humanista y laico? En tiempos antiguos a escala humana, tan lejanos como los primeros utensilios que pueden encontrarse, parece que la Tierra era adorada como diosa y se creía que estaba viva. El mito de la gran madre se encuentra en la mayoría de las religiones antiguas. La madre es una figura compasiva y femenina, la primavera de toda la vida, de la fecundidad, de la gentileza. Ella es también el portador severo e implacable hacia la muerte. Como recuerda Aldous Huxley en *The Human Experience* [La experiencia humana]:

«En el hinduismo, Kali es a la vez la madre infinitamente amable y amorosa y la diosa terrorífica de la destrucción, que lleva un collar de cráneos y bebe la sangre de los seres humanos en uno de ellos. La descripción es profunda; si das la vida necesariamente tienes que dar la muerte porque

la vida siempre acaba en una muerte y debe renovarse a través de la muerte».

En algún momento, no hace más de unos pocos miles de años, se arraigó el concepto de un Dios maestro remoto, un vigilante de Gaia. Al principio podría haber sido el Sol pero después tomó la forma que ahora tiene entre nosotros, la de un gobernador del universo extremadamente remoto aunque personalmente inmanente. Charlene Spretnak, en su sugerente e interesante libro *The Spiritual Dimensions of Green Politics* [Las dimensiones espirituales de la política verde], atribuye el primer rechazo de Gaia, la diosa Tierra, a la conquista de la antigua civilización centrada en la Tierra por los guerreros adoradores del Sol de las tribus indo-europeas invasoras.

«Imagínate tú mismo como testigo de aquel momento decisivo en la historia, es decir, como un miembro de la pacífica e ingeniosa cultura orientada hacia la Diosa en la vieja Europa. (No pienses en un "matriarcado") Puede haberlo sido pero nadie lo sabe y ésta no es la cuestión principal.) Estamos en el 4500 antes de Cristo. El lector está caminando a lo largo de un elevado risco, mirando a través de las llanuras hacia el este. En la distancia ve una ola masiva de jinetes galopando hacia su mundo en animales extraños y poderosos (el antecesor europeo del caballo se había extinguido). Traen pocas mujeres, un gobierno centrado en un jefe y sólo una técnica primitiva de impresión para marcar sus dos símbolos, el Sol y el pino. Se movieron en oleadas primero hacia Europa del sudeste, después hacia Grecia, a través de toda Europa, también hacia el Cercano y Medio Oriente, el Norte de África y la India. Trajeron un dios celeste, un culto guerrero y un orden social patriarcal. Y en este orden es en el que vivimos todavía en una cultura indoeuropea, aunque muy avanzada tecnológicamente.»

La evolución de estos jinetes hacia hombres modernos que cabalgan en sus infinitamente más poderosas máquinas de destrucción de los hábitats de nuestros compañeros en Gaia parece un paso pequeño. El resto de nosotros, en el infierno confortable y cómodo de la vida urbana, nos preocupamos muy poco de lo que hagan mientras continúen proporcionándonos comida, energía y materias pri-

mas y nosotros podamos continuar con el juego de la interferencia humana.

En tiempos antiguos, la creencia en una Tierra y en un cosmos viviente representaba el mismo concepto. Cielo y Tierra estaban cercanos y formaban parte de un mismo cuerpo. A medida que pasó el tiempo y creció la conciencia de las amplias distancias espacio-temporales mediante inventos como el telescopio, el universo fue haciéndose comprensible y el de Dios retrocedió hasta su lugar actual, detrás del Big Bang, el evento al que se atribuye el origen de todo. Al mismo tiempo, a medida que creció la población también aumentó la proporción de la misma forzada a seguir una vida urbana fuera del contacto con la naturaleza. Durante los dos últimos siglos casi todos nos hemos convertido en habitantes de ciudades y parece que hemos perdido el interés tanto en el significado de Dios como en el de Gaia. Tal como escribió el teólogo Keith Ward en el Times de diciembre de 1984:

«No es que la gente conozca lo que es Dios y haya decidido rechazarle. Parece que mucha gente ni siquiera conoce lo que es la idea tradicional ortodoxa de Dios, compartida por el judaísmo, el Islam y la Cristiandad. No tienen la menor idea de lo que quiere decir la palabra Dios.»

Ocurre simplemente que el concepto de Dios no tiene sentido o lugar posible en sus vidas. En lugar de ello o bien inventan alguna idea vaga de fuerza cósmica sin ninguna aplicación práctica o bien apelan a alguna figura medio olvidada de superpersona barbuda que interfiere constantemente con las leyes de la naturaleza».

Me pregunto si éste es el resultado de una privación sensorial. ¿Cómo podemos reverenciar el mundo vivo si ya no podemos oír la canción de un pájaro entre el ruido del tráfico u oler la suavidad del aire fresco? Si el lector piensa que esto es una exageración recuerde la última vez que se estiró en un prado bajo la luz del Sol y olió la fragancia del tomillo y oyó y vio cantar y volar las alondras. Piense en la última vez que miró el negro azul oscuro del cielo aunque suficientemente claro para ver la Vía Láctea, la congregación de estrellas, nuestra galaxia.

La atracción de la ciudad es seductora. Sócrates dijo que no pasa nada interesante fuera de sus límites y mucho más tarde el doctor Johnson expresó su concepto de la vida en el campo:

*«Un campo verde es como otro cualquiera». Muchos de nosotros estamos atrapados en este mundo de la ciudad, una comedia de enredo interminable, y a menudo jugamos el papel de espectadores, no el de actores. Es interesante tener comentaristas sensibles como Sir David Attenborough que lleva el mundo natural con sus imágenes de bosques y vida salvaje a las pantallas de la televisión de nuestras habitaciones suburbanas. Sin embargo, la pantalla de televisión sólo es una ventana y raramente lo suficientemente transparente como para poder ver el mundo exterior; nunca nos puede retrotraer al mundo real de Gaia. La vida de la ciudad refuerza y corrobora la herejía del humanismo, la devoción narcisista a los intereses exclusivamente humanos. El misionero irlandés Sean McDonagh escribió en su libro *To Care for the Earth* [Cuidar la Tierra]: «Los 20.000 millones de años de amor creativo de Dios sólo se interpretan como el escenario en que se celebró el drama de la salvación humana, o como algo esencialmente pecaminoso en sí mismo que necesitaba transformación».*

Los dominios de las grandes religiones ahora se encuentran en los últimos baluartes de la existencia rural, en el Tercer Mundo de los trópicos. En todas las demás partes, Dios y Gaia, que en tiempos se consideraban juntas y respetadas, ahora se encuentran divorciadas y desconsideradas. Como especie que casi hemos renunciado a pertenecer a Gaia y hemos dado a nuestras ciudades y a nuestros países los derechos y responsabilidades de la regulación ambiental, luchamos para mantener las relaciones humanas de la vida urbana aunque todavía suspiramos por el mundo natural: Queremos ser libres para conducir nuestro coche en el campo y en las zonas silvestres sin contaminar cuando lo hacemos. Queremos comer el pastel y conservarlo. Aunque semejante esfuerzo puede ser humano y comprensible, es ilógico. Nuestros humanistas se preocupan por

los pobres del interior de las ciudades o del Tercer Mundo y nuestra obsesión casi obscena con la muerte, el sufrimiento y el dolor, como si fueran el mal en sí mismos -estos pensamientos distraer la mente de nuestro dominio enorme y excesivo sobre el mundo natural. La pobreza y el sufrimiento no han sido enviados, son las consecuencias de lo que hacemos. Dolor y muerte son normales y naturales, no podríamos sobrevivir sin ellos. La ciencia, es cierto, ayudó al nacimiento de la tecnología. Cuando conducimos nuestros coches y escuchamos noticias de lluvia ácida en la radio, hemos de recordar que nosotros, personalmente, somos los contaminadores. Nosotros, no alguna figura diabólica vestida de blanco, compramos los coches, los conducimos y ensuciamos el aire. Por tanto somos responsables, personalmente, de la destrucción de árboles por el smog fotoquímico y la lluvia ácida. Somos responsables de la primavera silenciosa que predijo Rachel Carson.

Hay muchas maneras de mantenerse en contacto con Gaia. Los seres humanos individuales son colectivos celulares y endosimbióticos densamente poblados, aunque también constituyen entidades diferenciadas. Los individuos interactúan con Gaia en el reciclado de los elementos y en el control del clima del mismo modo que la célula también lo hace en el cuerpo. Se puede interactuar individualmente de un modo espiritual mediante una sensación de maravilla del mundo natural y sintiéndose una parte de él. De alguna manera esta interacción no es diferente del estrecho acoplamiento entre el estado de la mente y el cuerpo. Otra conexión se realiza a través de las potentes infraestructuras de las comunidades humanas y de transporte de masas. Como especie, movemos ahora una masa mayor de algunos materiales alrededor de la Tierra que la cantidad movilizaba por todo el biota de Gaia antes de que apareciésemos. Nuestro parloteo es tan alto que puede oírse en las profundidades del universo. Siempre, como ha ocurrido con otras especies anteriores y más antiguas dentro de Gaia, el desarrollo del todo surge de la actividad de unos pocos individuos. Los nidos urbanos, los ecosistemas agrícolas, lo bueno y lo malo, provienen de las consecuencias de la rápida retroalimentación positiva que empieza a partir de la inspiración de un individuo.

Una mala interpretación frecuente de mi idea de Gaia es que soy el paladín de la complacencia, que proclamo que los efectos de la re-
troalimentación siempre protegerán el medio ambiente de cualquier
daño serio que pueda causar el hombre. A veces se expresa de una
manera más cruda como «La Gaia de Lovelock da luz verde a la
industria para que contamine a su gusto». La verdad es casi diame-
tralmente opuesta.

Tal como la veo, Gaia no es una madre cariñosa y tolerante con las
malas conductas, ni tampoco es una damisela frágil y delicada en
peligro por las acciones humanas. Es severa y ruda, siempre man-
teniendo el mundo cálido y habitable para aquéllos que obedecen
las reglas, pero despiadada en la destrucción de los que las trans-
greden. Su objetivo inconsciente es un planeta adaptado para la vi-
da. Si la humanidad sigue en el camino actual, será eliminada con
la misma poca piedad que mostraría el microcerebro de un misil
nuclear balístico intercontinental en pleno vuelo hacia su objetivo.

Lo que he escrito hasta ahora ha sido un testamento construido al-
rededor de la idea de Gaia. He intentado mostrar que Dios y Gaia,
teología y ciencia, incluso física y biología no están separadas sino
que forman una única línea de pensamiento. Aunque soy un cientí-
fico, escribo como un individuo, y mis ideas probablemente son
menos comunes de lo que me gustaría pensar. Por tanto, déjenme
decir algo de lo que la comunidad científica tiene que decir al res-
pecto.

En ciencia cuanto más se descubre más caminos quedan abiertos
para la exploración. En ciencia es común que cuando las cosas son
vagas y poco claras, el camino sea como el de un borracho vaga-
bundeando en zigzag. A medida que nos tambaleamos y poco a po-
co nos damos cuenta de que nuestros juicios aturdidos señalan en la
dirección equivocada, cruzamos sobre el camino verdadero y nos
movemos casi tan lejos por el lado contrario igualmente equivocada-
do. Si todo va bien nuestras desviaciones disminuyen y el camino
converge hacia el verdadero, pero nunca sigue completamente. Es
una mera versión del viejo dicho in vino veritas. Esta manera de
encontrar la verdad es tan natural que a menudo programamos
nuestros ordenadores para resolver problemas demasiado tediosos

para nosotros mismos obligándoles a seguir el mismo método de ensayo y error, tambaleándose en un camino lleno de escollos. El proceso se dignifica y mixtifica llamándole «iteración», aunque el método es el mismo. La única diferencia es que se realiza tan deprisa que el ojo nunca ve los titubeos.

Hemos perdido el conocimiento intuitivo de lo que es la vida y de nuestro papel dentro de Gaia. Nuestros intentos de definir la vida se encuentran en un estadio muy parecido al del paseo del borracho. Los dos vértices opuestos que representan los extremos de la iteración se pueden ilustrar mediante un debate filosófico espléndido que se ha desarrollado durante los pasados veinte años entre los biólogos moleculares por una parte y la nueva escuela termodinámica por la otra. El libro de Jacques Monod “El azar y la necesidad”, publicado por primera vez en 1970, presenta de manera hermosa y clara un planteamiento riguroso y científicamente sólido basado en la creencia de un universo materialista y determinista. El otro vértice está representado por aquellos que, como Erich Jantsch, creen en un universo autoorganizado. Dicho planteamiento se refiere a la termodinámica de procesos irreversibles, de la que constituyen un ejemplo las estructuras disipativas como las llamas, torbellinos y la vida misma. Aunque los participantes son conocidos y respetados en el mundo anglosajón, una gran parte de este debate se ha desarrollado en francés, y por tanto muchos de nosotros nos hemos perdido las partes más divertidas.

Lo esencial de la controversia consiste en una actualización de la antigua batalla entre los holistas y los reduccionistas. Tal como nos recuerda Monod:

“Algunas escuelas de pensamiento (todas más o menos consciente o inconscientemente influidas por Hegel) ponen en cuestión el valor de planteamientos analíticos para problemas tan complejos como los seres vivos. De acuerdo con estas escuelas holistas que, como el ave fénix, renacen en cada generación, el planteamiento analítico (reduccionista) está condenado al fracaso por su intento de reducir las propiedades de una organización compleja a la "suma" de las propiedades de sus partes. Se trata de una disputa estúpida y desenfocada que únicamente pone en evidencia la falta

total de comprensión de lo que es el método científico por parte de los holistas y el papel crucial que juega el análisis en él. ¿Cuán lejos podría ir un ingeniero marciano que intentase entender un ordenador terrestre rechazando por principio la disección de los componentes electrónicos básicos de la máquina que ejecutan las operaciones del álgebra proposicional? ”.

Estas fuertes palabras se encontraban en la edición de 1970 de El azar y la necesidad. Quizá son mantenidas en la actualidad con un criterio menos extremo aunque sirven para expresar en forma adecuada cuál era, y todavía es, una parte de la corriente de opinión científica.

Nadie duda que haya ciencia reduccionista honesta y clara que nos ha permitido descifrar varios de los secretos del universo, o lo que no es menos importante, de las macromoléculas de los seres vivos que llevan la información genética de nuestras células. Sin embargo, por muy claro, fuerte y poderoso que sea este tipo de pensamiento no es suficiente en sí mismo para explicar los hechos de la vida. Consideremos el ingeniero marciano de Jacques Monod. ¿Hubiera sido una buena idea trocear con un lote de herramientas y desmontar de manera analítica el ordenador que encontró? ¿O hubiera sido mejor, como paso inicial, ponerlo en marcha y examinarlo como un sistema completo? Si el lector tiene alguna duda con respecto a la respuesta a esta pregunta baste considerar la idea de que este ingeniero marciano hipotético era un ordenador inteligente y el lector mismo el objeto que examinaba.

Por el contrario, en 1972, Ilya Prigogine escribió: «No es una inestabilidad sino una sucesión de inestabilidades lo que permite cruzar la tierra de nadie entre vida y no-vida. Sólo empezamos a desenredar algunas etapas. Este concepto de orden biológico lleva automáticamente a una apreciación borrosa del papel del azar y la necesidad para recordar el título de un trabajo bien conocido de Jacques Monod. Las fluctuaciones que permiten al sistema apartarse de los estados cercanos al equilibrio termodinámico representan el aspecto estocástico, la parte jugada por el azar. Por el contrario, la inestabilidad ambiental, el hecho de que las fluctuaciones se incremen-

tarán, representa la necesidad. Azar y necesidad colaboran en lugar de oponerse el uno al otro».

Estoy totalmente de acuerdo con Monod en que la piedra angular del método científico es el postulado de que la naturaleza es objetiva. El verdadero conocimiento nunca puede obtenerse atribuyendo «intenciones» a los fenómenos. Sin embargo, con la misma fuerza, niego que los sistemas nunca sean nada más que la suma de sus partes. El valor de Gaia en este debate es que se trata del organismo vivo más grande. Se puede analizar tanto como un sistema global como, de un modo reduccionista, una colección de partes. Este análisis no necesita distorsionar ni la individualidad ni la funcionalidad de Gaia más de lo que haría el movimiento de una sola bacteria comensal en la superficie de la nariz de uno.

Prigogine no fue el primero en identificar las insuficiencias de la termodinámica del equilibrio. Tenía muchos predecesores ilustres, entre ellos los físico-químicos J.W. Gibbs, L. Onsager y K.G. Denbigh, que exploraron la termodinámica del estado estacionario.

Sin embargo, fue el gran físico Ludwig Boltzmann quien señaló verdaderamente el camino para entender la vida en términos termodinámicos. Cuando leí el libro de Schrödinger *¿Qué es la vida?*, a primeros de los sesenta, me di cuenta por primera vez de que la vida planetaria se manifestaba por el contraste entre el estado cercano al equilibrio de la atmósfera de un planeta muerto y el desequilibrio exuberante de la Tierra.

Cuando pasamos de la claridad meridiana del mundo real a la tierra de pesadilla de las estructuras disipativas ¿qué aprendemos que haga la próxima sacudida vacilante menos errónea que las anteriores? He adquirido del punto de vista del mundo de Prigogine la confirmación de la sospecha de que el tiempo es una variable a menudo ignorada. En particular, muchas de las contradicciones aparentes entre estas dos escuelas de pensamiento parece que se resuelven si se contemplan a lo largo de una dimensión temporal en lugar de espacial. A través de estructuras disipativas hemos evolucionado desde un mundo de moléculas simples a las entidades más permanentes de los organismos vivos. Cuanto más nos alejamos del pre-

sente, tanto hacia el pasado como hacia el futuro, mayor es la incertidumbre. Darwin tenía razón cuando no quiso entrar en ninguna consideración acerca de los orígenes de la vida; como ha dicho Jerome Rothstein, las restricciones de la segunda ley de la termodinámica impiden que nunca podamos conocer algo acerca del origen o del final del universo.

El mundo antiguo del Arcaico vive en nuestros intestinos y en los de los demás animales. También en Gaia todavía vive el primitivo mundo caótico de estructuras disipativas que precedió a la vida. Un descubrimiento reciente y relativamente desconocido de la ciencia es que las fluctuaciones a cualquier escala, desde la viscosidad a la meteorología, pueden ser caóticas. No existe un determinismo completo en el universo, muchas cosas son impredecibles como una ruleta perfecta. Un ecólogo colega mío, C.S. Holling, ha observado que la estabilidad a largo plazo de los ecosistemas depende de la existencia de inestabilidades internas caóticas. Estos bolsillos de caos dentro del sistema gaiano más grande y estable sirven para probar los límites impuestos por las leyes físicas a la vida. De este modo se asegura el oportunismo de la vida y no queda ningún nicho por descubrir. Por ejemplo, vivo en una región rodeado por granjeros que crían ovejas. Es sorprendente ver cómo los jóvenes corderos, mediante su exploración continua de mis setos limítrofes, pueden encontrar el camino hacia la mejor hierba de mi terreno, en donde no hay animales paciendo. El comportamiento de la gente joven no es muy diferente.

Mi motivación para especular acerca de la guerra entre holistas y reduccionistas es ilustrar cuán polarizada puede encontrarse la propia ciencia. Déjenme concluir esta digresión y volvamos al tema de este capítulo, Dios y Gaia. Y permítanme empezar recordando el mundo de las margaritas, un modelo que es reduccionista y holista a la vez. Fue realizado para contestar a las críticas hacia Gaia, que la consideraban una teleología. La necesidad de reducción fue debida a que la relación de los incontables billones de seres vivos de la Tierra y las rocas, el aire y los océanos, nunca se podrían describir con pleno detalle por una serie de ecuaciones matemáticas. Se necesitaba una simplificación drástica. Sin embargo, el modelo,

con su estructura de bucle cibernético cerrado, también era holístico. Ello también se puede aplicar a nosotros mismos. No tendría sentido intentar desentrañar todas las relaciones entre los átomos dentro de las células que constituyen nuestros cuerpos. Sin embargo, ello no evita que seamos reales e identificables, y que tengamos un intervalo de vida de por lo menos setenta años.

También nos encontramos en una disputa entre contrarios por nuestra lealtad a Gaia y el humanismo. En esta batalla, humanistas con intencionalidad política han dado a la palabra «reduccionista» un sentido peyorativo para desacreditar la ciencia y para cuestionar el método científico. Sin embargo, todos los científicos son hasta cierto punto reduccionistas; no hay lugar para la ciencia sin reduccionismo a algún nivel. Incluso los analistas de sistemas holísticos, cuando deben estudiar sistemas desconocidos, hacen pruebas, como perturbar el sistema y observar la respuesta, o hacen un modelo del mismo y reducen después este modelo. En biología es imposible evitar la reducción aunque queramos. Los materiales y las intenciones entre los seres vivos son tan fenomenalmente complejas que sólo se puede obtener una descripción holística cuando se adapta al biota que existe como una entidad identificable, es decir, una célula, una planta, un nido o Gaia. Ciertamente, se puede observar y clasificar las propias entidades con un mínimo de invasión pero más pronto o más tarde la curiosidad nos moverá a estudiar de qué están hechas las entidades y cómo trabajan. En cualquier caso, la idea de que la mera observación es neutra en sí misma es una ilusión.

Alguien dijo una vez que la razón por la que el universo funciona es que Dios lo está observando siempre y por tanto reduciéndolo. Sea lo que sea, no hay duda de que una reserva, un parque natural o un ecosistema, son reducidos proporcionalmente a la cantidad de tiempo que nosotros y nuestros hijos perturbamos la vida salvaje observándolos.

En *The Self Organizing Universe* [El universo autoorganizado], Erich Jantsch planteaba razones importantes para la presencia de una tendencia general a la autoorganización, de manera que la vida, en lugar de ser una casualidad, era una consecuencia inevitable.

Jantsch basaba sus planteamientos en las teorías de los pioneros de lo que puede llamarse la «termodinámica de procesos irreversibles»: Max Eigen, Ilya Prigogine, Humberto Maturana, Francisco Valera y sus sucesores. En la medida que se acumula la evidencia científica y se desarrollan las teorías en este tema recóndito puede que la metáfora de un universo viviente pueda ser incluida. Se podría racionalizar la intuición de Dios, algo de Dios podría convertirse en algo tan familiar como Gaia.

Por ahora mi fe en Dios permanece en un estado de agnosticismo positivo. Estoy demasiado implicado en la ciencia para tener una fe definida; también resulta igualmente inaceptable para mí, desde un punto de vista espiritual, el mundo materialista de la pura realidad. Arte y ciencia parecen estar interconectados entre sí y con la religión, encontrándose en un estado de expansión mutua. El hecho de que Gaia pueda ser algo tanto espiritual como científico es para mí sumamente satisfactorio. A partir de las cartas y conversaciones he aprendido que ha sobrevivido un sentimiento por el organismo, la Tierra, y que muchos sienten la necesidad de incluir estas creencias antiguas en un sistema de convicciones, tanto para ellos mismos como porque sienten que la Tierra de la que forman parte se encuentra amenazada. De ningún modo veo a Gaia como un ser consciente, un Dios alternativo. Para mí Gaia está viva y es parte del universo inefable y yo soy una parte de ella.

El filósofo Gregory Bateson expresó esta forma de agnosticismo del siguiente modo:

«La mente individual es inmanente pero no únicamente al cuerpo. También es inmanente a caminos y mensajes fuera del cuerpo, y existe una gran mente de la cual la mente individual sólo constituye un subsistema. Esta mente más grande es comparable a Dios y es quizá lo que alguna gente entiende por Dios, aunque sigue siendo inmanente a los sistemas sociales interconectados a la ecología planetaria».

Como científico creo que la naturaleza es objetiva, pero también creo que la naturaleza no está predeterminada. El famoso principio de incertidumbre que descubrió el físico Werner Heisenberg consti-

tuyó la primera fractura en la cristalina estructura del determinismo. Ahora se ve que el caos puede ser descrito mediante una estructura matemática ordenada. Esta nueva forma de comprensión teórica clarifica la práctica de la predicción meteorológica. Antes se creía, tal como había establecido el físico francés Laplace, que si se disponía de un conocimiento suficiente (y en la actualidad ello quiere decir capacidad de cálculo de ordenador) se podría predecir cualquier cosa. Fue emocionante descubrir que hay un caos real y honesto amablemente repartido por todo el Universo y empezar a entender por qué es imposible en este mundo predecir algo aparentemente tan sencillo como si va a llover mañana en algún punto concreto. El caos verdadero está aquí como una contrapartida al orden. El determinismo se ve reducido a una colección de fragmentos, como joyas que han caído en la superficie de un cuenco de brea.

La ciencia tiene sus modas. Algo que está garantizado que atraerá interés y empezará una moda nueva es la exploración de una patología. La salud es mucho menos interesante que la enfermedad. Me acuerdo bien de una visita que hicimos como escolares al museo de la London School of Hygiene and Tropical Medicine en la que se mostraban modelos de tamaño natural de gente infectada por enfermedades tropicales. Aunque no tan bien hechos, tenían un aspecto tan extraño y tan horrible que se podían comparar con los horrores profesionalmente descritos en las figuras de cera de Madame Tussaud. La vista de los modelos de tamaño natural de las víctimas de elefantiasis o lepra y la consideración de su sufrimiento hicieron soportables las agonías adolescentes de un niño en edad escolar. La ciencia contemporánea está igualmente fascinada por patologías de tipo matemático. La ecología teórica, que ya hemos comentado, se ha concentrado más en el estudio de los ecosistemas enfermos que de los sanos. Los caprichos de la meteorología son más interesantes que la estabilidad a largo plazo del clima. La creación continua nunca ha tenido una oportunidad frente a la patología extrema del Big Bang.

El interés de la ciencia por las patologías tiene una relación curiosa con la religión. Los matemáticos y los físicos se encuentran, sin

darse cuenta, dentro de la demonología. Les gusta investigar «teoría de catástrofes» o «atractores extraños». Luego buscan entre sus colegas de otras ciencias ejemplos de patologías que se adapten a sus curiosos modelos. Quizá tendría que explicar que en matemáticas un atractor es un estado de equilibrio estable, como un punto en el fondo de un cuenco suave al que siempre irá a descansar una bola. Al igual que puntos, los atractores también puede ser líneas, planos o volúmenes y son lugares donde los sistemas tienden a asentarse para descansar. Los atractores extraños son regiones caóticas de dimensión fractal que actúan como agujeros negros, dibujando las soluciones de las ecuaciones de sus dominios desconocidos y singulares. Los fenómenos del mundo natural -como la meteorología, la enfermedad o los fracasos de los ecosistemas- se caracterizan por la presencia de atractores extraños en el aparato de sus matemáticas, estando a: acecho como bombas de relojería, zonas de inestabilidad, fluctuaciones cíclicas o simplemente caos.

El aspecto notorio de los organismos vivos reales y sanos es su habilidad aparente para controlar o limitar estas influencias desestabilizadoras. Parece que el mundo de las estructuras disipativas, amenazado por la catástrofe y parasitado por atractores extraños, es el mundo antecedente de la vida y de Gaia, y al mismo tiempo constituye un submundo que todavía existe. La evolución estrechamente ligada del medio ambiente físico y las entidades autopoyéticas de la pre-vida dieron lugar a un orden nuevo de estabilidad, el estado asociado con Gaia y con todas las formas de vida saludable. La vida y Gaia son básicamente inmortales incluso a pesar de estar compuestas de entidades que por lo menos incluyen estructuras disipativas, un encuentro curioso entre los atractores extraños y otros generadores de caos que construye el mundo imaginario de las matemáticas y los demonios de las creencias religiosas antiguas. Un paralelismo que va más allá e incluye una asociación con enfermedad en lugar de salud, hambre en lugar de abundancia, tempestad y no calma. Un santo de esta rama fascinante de las matemáticas es el francés Benoît Mandelbrot. A partir de sus expresiones en dimensiones fractales se pueden producir ilustraciones gráficas de todo tipo de paisajes naturales: líneas costeras, cadenas de monta-

ñas, árboles y nubes, todos ellos de una realidad impresionante. Sin embargo, cuando el arte científico de Mandelbrot se aplica a atractores extraños vemos, de forma gráfica, las imágenes coloreadas vívidamente de un demonio o un dragón.

La teoría de Gaia puede parece aburrida en comparación con esos exotismos. Una cosa como la salud se considera garantizada hasta que falla. Ello puede ser el motivo por el que tan pocos científicos y teólogos están interesados por ella y prefieren la exploración del universo o de los orígenes de la vida a la exploración del mundo natural que les rodea. Encuentro difícil explicar a mis colegas por qué prefiero trabajar y vivir sólo en las profundidades del campo. Piensan que debo perderme todo el interés de la exploración. Prefiero una vida con Gaia ahora y aquí, y mirar atrás sólo a esta parte de la historia que es cognoscible, no a lo que pudo haber sido antes de que ella se convirtiese en un ser. Un amigo me preguntó que si, eso es así, por qué escogí dedicar una parte tan importante de este libro a la historia de la Tierra. Encuentro que la manera más fácil de explicar mis razones de esta inconsistencia aparente es mediante una fábula.

Imaginemos una isla en medio de un cálido mar azul con playas de arena. El bosque exuberante de detrás de éstas abre el camino hacia unos pequeños picos montañosos que dibujan una forma aguda y clara en el horizonte distante. No hay signos de la presencia de ningún habitante, humano o de otro tipo. Lo que a primera vista parece ser un pueblo de casas de piedra blanca es, visto de cerca, un afloramiento de creta que brilla como un láser a la luz del Sol. Sin embargo, hay algo extraño, uno parpadea porque la luz es muy brillante y mira otra vez. No es una ilusión, los árboles no son verdes, son la sombra oscura del azul.

La isla que contemplamos se encuentra en algún lugar dentro de 500 millones de años. Los detalles exactos son impredecibles y poco importantes para este relato, pero podemos decir que es más caliente que cualquier sitio cerca del mar de la Tierra actual, con una temperatura de 30 °C, y a menudo alcanza los 60 °C en el desierto del interior de la isla. Hay poco o casi nada de dióxido de carbono en el aire pero en lo que respecta a lo demás éste es muy parecido a

la composición actual, con la cantidad de oxígeno precisa para respirar, pero no demasiado como para convertir los incendios en incontrolables. Se ha producido una puntuación muy importante, y las formas de vida dominantes de la superficie terrestre son de una estructura que ningún zoólogo o botánico de nuestro tiempo reconocería.

En un prado pequeño cerca de la orilla se ha reunido un grupo de filósofos para celebrar una de estas reuniones civilizadas subvencionadas por una sociedad científica. Un simposio que deja mucho tiempo para nadar y pasear, o simplemente hablar sin prisa. Una participante tiene la teoría de que su forma de vida, tan improbable como la de muchos de los organismos del mar y de los microorganismos, no sólo evolucionó sino que fue creada artificialmente por una forma de vida consciente que vivió en el pasado geológico remoto. Basa su razonamiento en el tipo de sistema nervioso de los filósofos y, en general, de los animales terrestres. Este opera mediante la conducción directa de electricidad a través de hebras de un polímero orgánico, mientras que el de la vida oceánica opera por transporte iónico dentro de células elongadas (lo que nosotros reconoceríamos, por supuesto, como nervios). Los cerebros de los filósofos operan mediante semiconductores, lo que contrasta con los sistemas químicamente polarizados de los organismos marinos. En esta forma de vida nueva, los machos no existen como organismos conscientes móviles sino como simples formas vegetativas que proporcionan la información genética separada necesaria para que la recombinación pueda reducir la expresión de errores. El matrimonio todavía es una relación para toda la vida, aunque con los maridos enraizados en la Tierra como plantas -hay más de uno de este tipo entre un amante jardinero y las flores-. Nuestro filósofo argumenta que semejante sistema nunca podría haberse originado por azar sino que tiene que haber sido manufacturado en algún momento en el pasado. Como era de esperar su teoría no es bien recibida. No sólo se encuentra fuera del paradigma de la ciencia de aquellos tiempos sino que los teólogos y los escritores de cuentos imaginarios encuentran que este concepto repugna a su idea de un

origen único y espontáneo de un planeta vivo. Volver a la herejía creacionista es inaceptable.

Estos ocupantes de una futura Atlantis no tienen necesidad de hablar o escribir. La posesión de un sistema nervioso electrónico hace que el hablar sea redundante, son capaces de utilizar radio frecuencias para comunicarse directamente una amplia variedad de imágenes e ideas. A pesar de estas ventajas y de su sabiduría superior no son, como las ballenas de hoy en día, ni expertos en mecánica ni están interesados en los mecanismos. Siendo así, la idea de hacer un artefacto tan intrincado como un cerebro o un sistema nervioso están fuera de su comprensión y por tanto, de su mentalidad, fuera de las capacidades de una forma de vida anterior. El aspecto principal de esta fábula pretende argumentar que no es necesario conocer los detalles intrincados del origen mismo de la vida para comprender la evolución de Gaia y de nosotros mismos. De manera semejante, la consideración de estos lugares remotos de antes y después de la vida, cielo e infierno, puede ser irrelevante para el descubrimiento de una forma de vida decorosa. Podemos haber sido ayudados por la naturaleza del universo para evitar el caos y evolucionar de forma espontánea, en alguna orilla hadiana, en nuestra forma de vida ancestral. Parece improbable que provengamos de una forma de vida implantada aquí por visitantes del exterior, o que incluso llegase pegada a algún trozo de residuo comestible del espacio exterior. Me gusta pensar que Darwin descartó las preguntas acerca del origen de la vida no sólo porque la información disponible en su tiempo era tan escasa que la búsqueda de los orígenes de la vida hubiera tenido que quedar dentro del ámbito de la especulación sino porque, más convincentemente, se dio cuenta de que no era necesario conocer los detalles del origen de la vida para formular la evolución de las especies mediante la selección natural. Esto es lo que quiero decir cuando indico que el concepto de Gaia es manejable.

La creencia de que la Tierra está viva y que debe ser reverenciada todavía se mantiene en sitios remotos como el oeste de Irlanda y las zonas rurales de algunos países latinos. En estos sitios, los santuarios a la Virgen María parecen significar más, y atraer más amor y

devoción, que la misma iglesia. Los santuarios casi siempre se encuentran a cielo abierto, expuestos al Sol y a la lluvia, y rodeados de flores y arbustos depositados con cuidado. No puedo dejar de pensar que esta gente del campo está venerando a algo más que a la Virgen cristiana. Queda poco tiempo para evitar la destrucción de las selvas de los trópicos, con consecuencias que llegarán lejos tanto para Gaia como para la gente. La gente del campo, que está destruyendo sus propios bosques, a menudo son cristianos y veneran a la Virgen María. Si fuera posible que su mente y su corazón se conmovieran y vieran en ella la encarnación de Gaia entonces quizá se pudieran dar cuenta de que la víctima de su destrucción era ciertamente la Madre de la Humanidad y la fuente de la vida permanente.

Cuando este gran hombre bueno, el papa Juan Pablo, viaja a través del mundo, en un acto de gran humildad y respeto por la madre y el padre Tierra, se agacha y besa el asfalto del aeropuerto. A veces lo imagino caminando unos pocos pasos más allá del cemento muerto para besar el césped, que es parte de nuestra verdadera madre y de nosotros mismos.

EPILOGO

No voy a cesar en mi lucha mental, ni mi espada dormirá en mi mano hasta que haya construido Jerusalén en la tierra verde y agradable de Inglaterra.

(William Blake, Milton)

En cartas y conversaciones la gente pregunta a menudo, « ¿Cómo podemos vivir en armonía con Gaia?». Estoy tentado de contestar, « ¿Por qué me lo preguntas? Todo lo que he hecho es contemplar la Tierra de manera diferente; esto no me cualifica para prescribir un modo de vida para ti». Verdaderamente, después de veinte años de escribir y pensar acerca de Gaia, parece que no hay receta de cómo vivir con Gaia sólo consecuencias. Sabiendo que la pregunta de cómo vivir con Gaia, es seria y que semejante respuesta sería descortés al mismo tiempo que inútil, intentaré mostrar lo que vivir con Gaia significa para mí. Quizás entonces el interrogador descubrirá algo que compartamos.

Mi vida, en tanto que científico ermitaño, sería adecuada para muy pocos. Mucha gente es gregaria y disfruta con una conversación animada en compañía humana en los bares, iglesias y partidos. Vivir sólo con la naturaleza, incluso como unidad familiar, no está hecho para ellos. Por tanto, déjenme dar una vuelta alrededor del sitio en que vivimos, en el norte de Devon, y a medida que caminamos juntos intentaré explicar por qué prefiero la vida que llevo. Quizás entonces el lector encontrará su propio modo de vivir con Gaia.

Poco después de que Helen y yo viniésemos a vivir a Coombe Mill adoptamos un pavo y una pava reales. Cuando las aves de corral se pavoneaban seriamente y desplegaban sus colas de colores asombrosos producían una ilusión de grandeza que conectaba con los recuerdos de las casas solariegas. De hecho Coombe Mill es una pequeña casa de campo con paredes gruesas hechas de barro y paja

y un techo de pizarra, un «adobe» inglés. Para empezar teníamos 14 acres de tierra, ahora los hemos aumentado a 30 acres. Hay sitio para que vivan estos pájaros tan ruidosos entre nosotros ya que el vecino más próximo, se encuentra a un kilómetro de distancia. Por muy ruidosos que sean, a nosotros nos gusta su sonido de trompeta triunfante en tiempo de celo, cuando parecen anunciar la primavera. Durante el resto del año su extenso vocabulario cambia desde un gentil sonido de cloqueo y ronroneo a gritos como los del rebuzno del asno. Luego está el ladrido agudo de su alarma, cuando, más frecuentemente de lo deseado, perros salvajes vagan en nuestro terreno. Helen, la jardinera cuidadosa y responsable de nuestro medio ambiente, les llama macetas móviles y ambos hemos disfrutado de su colorida compañía durante años. Sólo tienen una desventaja: su costumbre, por amistad o a la espera de alguna comida, de reunirse en el pavimento que se encuentra fuera de la puerta. Allí dejan sus excrementos malolientes. Acostumbraba a maldecirlos cuando los pisaba o tenía que limpiarlos. Sin embargo, me di cuenta de que yo estaba equivocado y de que ellos tenían razón. Estos pájaros ecológicamente intencionados hacían lo posible para convertir el cemento muerto del camino en nuevo suelo vivo. ¿Qué otro mejor modo de digerir el cemento que mediante la aplicación diaria de nutrientes y bacterias provenientes de la eyección de sus deposiciones?

¿Por qué necesitamos 30 acres para vivir? No somos granjeros, creo que la compra de una casa con un terreno tan grande fue una reacción a los cambios que ocurrieron en nuestro último pueblo, Bowerchalke, situado a 200 kilómetros al este. Durante los veinte años que vivimos allí vimos cómo un pueblo vivo era desposeído de sus agricultores y cómo se destruía su digno modo de vida rural. Fue una violación y pillaje amables, no nos barrieron ordas salvajes provenientes de las praderas. La destrucción se produjo por una acumulación de millares de cambios ocurridos durante los años, hasta que el modelo entre lo que tenía que ser el campo y la realidad ya no coincidían. Para un visitante ocasional el pueblo hubiera parecido tan bonito como siempre, pero cada año que pasaba las granjas se metamorfoseaban en fábricas de negocios agrarios. Los

campos que en verano eran la gloria de Wiltshire, coloreados con amapolas entre el grano, se convirtieron en un mar uniforme de cebada libre de malas hierbas. Prados que antaño fueron jardines de flores salvajes fueron labrados y sembrados con un único tipo de hierba altamente productiva. Cuando nos mudamos estábamos decididos a encontrar un sitio donde no fuese probable que el medio ambiente cambiase otra vez de manera tan drástica. La mejor manera de conseguirlo parecía ser encontrar una casa con suficiente terreno alrededor para dejarnos controlar lo que ocurriría en él.

La primera vez que vi Bowerchalke fue en 1936, en un paseo en bicicleta a través del sur de Inglaterra durante unas vacaciones de verano del colegio. Entre todos los sitios entre Kent y Cornwall que visité ninguno me dejó una memoria más duradera de perfección, y decidí que allí estaría un día mi hogar. Planeé mi viaje con la idea fija de un general que va a la guerra. Como tal examiné mapas del ejército, en escala una pulgada por milla. Estos mapas eran tan detallados que tenían marcado casi cada casa y árbol, y las líneas de contorno finamente dibujadas describían la extensión del terreno. Pasé la mayoría de las tardes de invierno imaginando los sitios que visitaría. En aquellos días había pocos coches y todavía menos gente que intentase viajar por los pequeños caminos que intentaba usar. Con la ayuda de los mapas del ejército señalé el camino a través de la red de carreteras tortuosas que se unían en vértices en los pueblos y aldeas. Cada condado tenía su estilo propio de arquitectura y su propio acento. Mi viaje fue de unos 700 kilómetros y duró dos semanas. El estilo de vida de la Inglaterra de entonces hizo que este viaje se pareciese mucho más a una expedición que lo que ahora representa un viaje a Australia. No es que nos encontráramos minimizados, era el ritmo del viaje más lento y más humano el que agrandaba el mundo.

Como científico novel estaba interesado en cosas como las plantas silvestres, especialmente las venenosas como el beleño, el acónito y la mortal belladona. Una vez experimenté mascando una fracción de una hoja de una de ellas y aprendí qué fuerte era el malestar del envenenamiento por atropina. También estaba fascinado por los fósiles, y la zona costera de Dorset y Devon, donde se encuentran

como piedras en la playa, era parte de mi itinerario. Fui guiado a Bowerchalke por los nombres extraños de los pueblos de Wilts-hire y de Dorset. Tenía que ver a qué se parecían Plush, Folly y Piddletrenthide. Tuve que descubrir lo que era Sydling St. Nicholas y oír el sonoro son de Whitchurch Canonicorum. Para llegar a estos pueblos mi mapa mostraba que tenía que seguir el valle del Ebble, que guía hasta Bowerchalke en una pendiente suave que continúa hasta los prados elevados de Dorset. El único lugar donde las líneas de nivel se apretaban y marcaban una colina empinada, se encontraba en el valle situado justo más allá de Bowerchalke: un camino ideal para viajar en bicicleta.

Todavía puedo recordar cuando pasé por el camino hacia Broadchalke, con los lechos de berros a mi izquierda, y di la vuelta a un ángulo para ver ante mí el pueblo pequeño y pintoresco de Bowerchalke, el escenario de un anfiteatro compuesto por colinas de verdes pendientes recubiertas de matas. Llegué allí alrededor de las cuatro en una tarde soleada de un domingo de julio. Estaba sediento pero, inusualmente, no había indicadores fuera de las casas ofreciendo té. En aquellos días los paseantes y los ciclistas eran suficientemente abundantes como para resultar rentable que los habitantes dedicasen un rato a vender refrescos. Sin embargo esta región era tan remota, y los viajeros tan pocos, que estos esfuerzos hubieran generado un beneficio pequeño. Pregunté a un hombre que caminaba por allí si había alguien que pudiese solucionar mi necesidad, «Sí», dijo, «la señora Gulliver, que está en la casa blanca de allí a veces hace té»; y lo hizo. Fue el recuerdo de la plácida tranquilidad de Bowerchalke, cuando el campo y la gente se fundían en un natural decoro, libre de cualquier pátina de ciudad, lo que hizo que permaneciese en mi mente y lo que me llevó allí otra vez veinte años después para edificar el hogar de mi familia.

El acto reciente de destrucción del campo inglés es un vandalismo casi sin parangón en la historia moderna. Hace una centuria Blake se dio cuenta de la amenaza de estos negros molinos satánicos, pero nunca supo que un día se extenderían hasta que toda Inglaterra fuera una fábrica de harina. La humanidad y la naturaleza han evolucionado conjuntamente para formar un sistema que mantiene una

rica diversidad de especies, algo que inspiró a los poetas e incluso a Darwin, quien escribió sobre el misterio de esa amalgama enmarañada. Era tan familiar, tan dado por supuesto, que nunca nos dimos cuenta de ello hasta que ha desaparecido. Si alguien propusiese construir una carretera nueva a través de la catedral de Salisbury la reacción sería inmediata. Sin embargo, los granjeros recibieron dinero del Ministerio de Agricultura para emular las llanuras, estos desiertos fabricados por el hombre en donde no crece otra cosa que el grano y no vive nada más que los granjeros y su ganado. La tromba anual de máquinas grandes y numerosas y el vertido generoso de pesticidas y herbicidas aseguraron que todo, excepto algunas especies de plantas e insectos resistentes, fuese eliminado. Los granjeros al viejo estilo no lo pudieron digerir y dejaron la tierra a jóvenes agricultores graduados en la facultad, que trabajaban como ejecutivos para instituciones ciudadanas. Un viejo granjero me dijo: «No llevo una granja para ser un mecánico en una fábrica». Pero todo ello era maravillosamente eficaz y pronto Inglaterra producía más alimento del que se podía comer.

La destrucción todavía continúa. Incluso aquí en Devon, los setos y los sotos siguen cayendo bajo las sierras eléctricas y las excavadoras. Rachel Carson acertó en su triste predicción de una primavera silenciosa, pero nos ha llegado no sólo por el envenenamiento por pesticidas, como ella imaginó, sino por el ataque en todos los frentes a los enemigos de los granjeros: «malas hierbas, plagas y bichos». Los pájaros necesitan un sitio para anidar y dónde mejor que en los setos, estos maravillosos bosques alineados que antaño dividían nuestros campos. El gobierno, con la ayuda de funcionarios negligentes, ha pagado subsidios generosos a los granjeros para arrancar los setos, hasta que la vida silvestre ha sido destruida; esto es tan efectivo como si el terreno hubiera sido rociado con pesticidas. Los ecologistas, que deberían de haber visto lo que estaba pasando y protestar antes de que fuese demasiado tarde, estaban demasiado ocupados luchando en batallas urbanas, o haciendo manifestaciones fuera de las plantas de energía nuclear. Su batalla, aunque reivindicasen otra cosa... era mucho más contra la autoridad, representada por el monolítico comité directivo de la energía eléc-

trica. Denunciaron los aerosoles venenosos porque eran productos de las odiadas industrias químicas multinacionales. Sin embargo, fueron muy pocos los amigos de la Tierra que protestaron por las granjas de negocio agrícola, o se dieron cuenta de la labor del ejército mecanizado de excavadoras y taladoras trabajando para que el paisaje fuera estéril, sólo útil para la siembra, de grano del año siguiente. No hay excusa para su descuido. Marion Shoard, en su libro emotivo y bien editado, *The Theft of the Countryside* [El robo del campo], dijo todo esto que he dicho y mucho más.

Para los que ven el mundo en términos de un conflicto entre sociedades humanas y grupos de poder, mi punto de vista personal sobre el cambio de paisaje puede parecer irrelevante y obsesivo. También está la gran mayoría en cualquier lugar, tanto si se encuentra dentro de la comodidad de las viviendas urbanas con aire acondicionado del Primer Mundo, o en la miseria de una ciudad de chabolas.

¿Quién debe ser culpado en mayor grado por la destrucción? Sin lugar a dudas son los científicos y los agrónomos que trabajaron para hacer que la agricultura fuera más eficiente. La experiencia de falta de alimentos hasta un punto cercano a la muerte por hambre fue un estímulo poderoso para hacer las islas Británicas autosuficientes en alimentos. Lo sé porque yo constituía una pequeña parte de ello.

En mi papel como inventor ayudé a mis amigos y colegas del Grassland Research Institute cerca de Stratford-upon-Avon en los años cuarenta. La intención era el aumento del rendimiento de las granjas inglesas pequeñas. Me acuerdo de los sermones a los jóvenes agricultores acerca de la ineficacia de los setos que dificultaban el movimiento libre de las máquinas alrededor del campo, en el desperdicio de los prados dejados como pasto permanente en comparación con una buena cosecha de monocultivo de centeno. Nunca pensamos que el mensaje fuese oído de manera tan completa que el gobierno se animara a elaborar una ley que dio lugar a la eliminación de los setos y a la remodelación del comercio agrícola. Ni pasó por nuestra imaginación que la mayoría de los agricultores jóvenes comparten con la mayoría de jóvenes de todas partes su fascinación por los juguetes mecánicos. Nosotros, y con nosotros el go-

bierno, les dimos el dinero para comprar, y la licencia para utilizar, algunas de las armas más peligrosas y destructivas nunca usadas. Armas para luchar contra los enemigos del agricultor, que son cualquier otra forma de vida que no sean las cosechas, el ganado, la gente contratada y la familia del agricultor.

Si alguien pudiera pensar que estoy confundido, que éste era otro ejemplo de la explotación implacable hecha por un gobierno de capitalistas al servicio de unas pocas multinacionales, le recordaría que empezó a finales de los años cuarenta, durante el período de gobierno laborista de posguerra, una administración segura en el poder, llena de confianza y comprometida con su ideología socialista: La destrucción del campo fue independiente de la política, se llevó a cabo a partir de buenas intenciones ayudadas por la tendencia de los funcionarios a aplicar efectos de retroalimentación positiva con subsidios, o negativa con impuestos. Los agricultores trabajan sobre márgenes muy estrechos. Pueden poseer tierra que vale hasta un millón de libras, pero sus beneficios pueden ser muy pequeños en comparación con los beneficios de una inversión sencilla. Un subsidio minúsculo puede convertir una pérdida pequeña en un rendimiento importante. El campo de la mayor parte de Inglaterra ha desaparecido y lo que queda aquí en las tierras del oeste está desapareciendo porque el gobierno continúa pagando a los granjeros un subsidio que proporciona lo justo para hacer rentable que actúen como destructores en lugar de jardineros. El subsidio pequeño para eliminar los setos ha dado lugar a la pérdida de alrededor de 100.000 millas de ellos en las últimas décadas. Un subsidio igualmente pequeño los volvería a poner en su sitio otra vez aunque pasarían generaciones antes de que recuperasen su funcionalidad como ecosistema y devolvieran su inspiración artística al paisaje del campo.

Por tanto, ¿qué debemos hacer en lugar de ello? Mi visión de una Inglaterra futura sería como la de Blake: edificar una Jerusalén en esta tierra verde y agradable. Ello implicaría volver a las pequeñas ciudades densamente pobladas, nunca tan grandes que el campo estuviera más lejos de un paseo o de un trayecto en autobús. Por lo menos un tercio de la tierra tendría que revertir en tierra arbolada y

páramo, lo que los granjeros ahora llaman tierra abandonada. Una parte podría estar abierta a la gente para actividades de recreo pero una sexta parte, por lo menos, tendría que estar «abandonada», sólo disponible para la vida silvestre. La agricultura sería una mezcla de producción intensiva, donde fuera adecuado que así fuera, y de granjas pequeñas no subvencionadas para los que tuvieran vocación de vivir en armonía con la tierra. En los años recientes, la sobreproducción de alimentos por las inmoderadas actividades agrícolas de la Comunidad Económica Europea, incluyendo Inglaterra, ha sido tan grande que estos sucesos han dado lugar a mi propuesta de un plan práctico básico para la gestión del campo.

En su desesperación malhumorada, a veces he oído la parodia que hicieron los verdes de los versos de Sir John Betjeman, escritos al principio de la segunda guerra mundial:

Venid bombas amistosas y caed en Slough,
para librarnos del arado.
Las coles vienen ahora;
la Tierra exhala.

Se convierten en:

Venid cabezas nucleares amistosas, golpeadles
y derribad su ciudad siempre en expansión.

No hace falta semejante catarsis horrible, incluso para los esperados. Dejada a sí misma, Gaia se relajará en otra larga Edad de Hielo. Olvidamos que el templado hemisferio norte, el hogar del Primer Mundo, goza ahora de un breve verano entre largos períodos de invierno que duran alrededor de un centenar de miles de años. Incluso las cabezas nucleares no devastarían la Tierra de esta manera, ni lo haría así un «invierno nuclear», si pudiera ocurrir y durar lo suficiente para volver la Tierra a su estado normal de congelación. El estado natural de aquí en Devon ha sido, durante la ma-

yor parte del millón de años pasado, un invierno ártico permanente. Incluso tan cerca del océano, el clima todavía era tan amargamente frío y desértico como lo es ahora en la Isla del Oso, en el océano Artico. Sólo 80 kilómetros al norte o al este de Coombe Mill estarían los grandes glaciares permanentes de las «Edades de Hielo». Estas cuchillas de excavadoras heladas raspan cualquier vestigio de vida en la superficie que haya florecido en las etapas interglaciales como la actual.

Entonces, ¿por qué preocuparse de la destrucción del campo que hace, como mucho, sólo unos pocos millares de años que existe y que pronto desaparecerá de nuevo? Me preocupo porque el campo inglés era una gran obra de arte, un sacramento como las catedrales, la música o la poesía. Todavía no ha desaparecido totalmente y me pregunto si no hay nadie preparado para permitirle sobrevivir el tiempo suficiente como para ilustrar una relación amable entre las personas y la tierra, un ejemplo vivo de cómo un grupo pequeño de gente lo hizo bien durante un breve período.

Lo poco que ha quedado de la vieja Inglaterra todavía se encuentra amenazado. Los ilustres guardianes del paisaje parecen no darse cuenta de su existencia. Ven el campo a través de nociones románticas de su belleza escénica. En mi región, Devon, sólo miran la tundra de Dartmoor y la ven como algo que debe ser preservado a cualquier precio. La tundra -la turbera encharcada, demasiado húmeda y demasiado fría para que crezcan los árboles- es un lugar habitual en la frontera entre las zonas polares y templadas, un resto de lo que era esta zona durante la última glaciación. Por el contrario, los mismos guardianes contemplan la tierra del norte de Dartmoor, con sus granjas pequeñas poco eficientes, ricas en vida silvestre y comunidades de pueblos que apenas han cambiado desde hace mucho tiempo, como algo sin valor y desechable, un sitio adecuado para nuevos usos, como un pantano, una nueva carretera o un polígono industrial.

A menudo pienso que estos planificadores de ciudades que actúan de manera tan destructiva han sido engañados por el gran novelista Thomas Hardy. Sus escritos influyeron profundamente a mi madre, nacida y criada en ciudad, una mujer que pronto vio el campo a

través de las gafas distorsionadas de Hardy. Sin embargo, mi padre nació en el Wessex de Hardy y me mostró cuán diferente era la realidad. Hardy, por muy brillante que fuese su caracterización, no comprendió el campo y sólo lo utilizó como un fondo para desarrollar su perspectiva trágica de la condición humana.

La Inglaterra que conocí cuando era niño y adolescente era imponentemente hermosa, los setos y los pequeños matorrales eran abundantes, y había arroyos y ríos repletos de peces que alimentaban a las nutrias. Este paisaje inspiró a generaciones de poetas para describir los sentimientos que nosotros mismos no podíamos expresar. Sin embargo, aquel paisaje de Inglaterra no era un ecosistema natural, era un jardín del tamaño de una nación, maravillosa y cuidadosamente atendido. Los monocultivos agrícolas degradados de hoy en día -con sus asquerosas baterías para el ganado y las aves, sus feos edificios de paredes de metal y maquinaria rugiente y maloliente- han hecho que el campo parezca formar parte de los negros molinos satánicos de Blake. Sé que a mí me parece de este modo porque conocí como era. Desde las ciudades y desde el extranjero vienen visitantes a Coombe Mill y elogian las pocas glorias que quedan. Ellos, y los planificadores del campo, no comprenden que si pronto no paramos el ecocidio, las tristes predicciones de Rachel Carson de una primavera silenciosa serán realidad, no porque hayamos envenenado los pájaros con pesticidas, sino porque hemos destruido sus hábitats, les hemos arrebatado un lugar donde vivir.

Siendo un inglés típico, no espero que «ellos», la Administración, cambien sus puntos de vista. Nadie estaba a favor de estas ideas excepto mi familia, que intentó hacerlo lo mejor posible con el terreno que poseemos en Coombe Mill. Lo hemos convertido en un hábitat y un refugio para algunas de las plantas y animales que el comercio agrícola está destruyendo. Este es el modo que nosotros, personalmente, hemos elegido para vivir con Gaia.

Sólo somos tres viviendo allí, pero 30 acres no son mucho más difíciles de manejar que un jardín suburbano. El césped de un jardín siempre necesita que lo estén segando, alimentando, regando y quitándole las malas hierbas, un trabajo, o un coste, incesante si al-

guien tiene que hacerlo por nosotros. Diez acres de nuestro terreno es hierba. No es un césped de pesadilla que requiera la atención continua de un ejército de jardineros; crece como un prado, rico en flores' salvajes y animales pequeños. Los prados se dividen y forman un marco para los 20 acres de árboles plantados. Sólo necesita disfrutarlo y cortarlo una vez al año cuando la hierba ha crecido demasiado. Los granjeros locales están encantados de venir y cortar, utilizan la hierba como forraje y pagan por ella. El coste de mantener 10 acres de prado es comparable al de un jardín urbano bien cuidado. Los árboles necesitan más atención pero no tanta como para ser de ningún modo una carga para ninguno de nosotros tres.

El río Carey divide nuestro terreno en dos partes iguales, lo que plantea un problema. El río pasa cerca de la casa, que en tiempos fue un molino de agua, y tiene un ancho de alrededor de 18 metros. No puede ser cruzado fácilmente caminando y pronto descubrimos que llegar a nuestro nuevo terreno implicaba un paseo de 8 kilómetros. Los puentes a través del Carey son espaciados. Hace dos años decidimos construir un puente para atender más fácilmente los 10.000 árboles que fueron plantados de nuevo en la parte oeste del Carey. La metáfora de tender un puente casi se ha convertido en un tópico. Sin embargo, intentar construir un puente en la vida real, es una experiencia extraordinaria, personalmente, el poder de reducir una metáfora a la práctica.

Como el lector habrá comprendido, somos gente solitaria y no nos mezclamos mucho con nuestros vecinos. Sin embargo, en esta parte del oeste de Devon fuimos bien recibidos nada más llegar, y hemos experimentado más amabilidad espontánea que en cualquier otro lugar donde hubiéramos vivido. Helen, nuestro hijo John y yo estamos disminuidos físicamente de diversas maneras y por tanto contratamos una persona sana, lo que no es suficiente para hacerse cargo de un sitio como éste. Dicho lugar no hubiera florecido sin los pródigos cuidados y la generosa ayuda de nuestros amigos del pueblo, Keith y Margaret Sargent. Nuestra casa y los edificios que se encuentran en el resto del lugar están hechos de barro y paja con techo de pizarra. Nunca habrían sobrevivido a las tormentas inver-

nales si no hubiera sido por las expertas reparaciones de nuestros otros amigos del pueblo, y previos ocupantes de Coombe Mill, Ernie y Bill Orchard. Sin embargo, no fue hasta que empezamos a planificar nuestro puente que experimentamos el vigor pleno de la comunidad en la que estamos inmersos.

Cuando estos amigos supieron cuál era nuestra intención, se empezó a formar el puente, primero en la imaginación como proyecto excitante y luego de manera más sólida, a medida que se dibujaban los planos y se recogían los materiales. Ellos tenían la experiencia necesaria para hacerlo junto con el ánimo y la alegría de una tarea desafiante, surgida únicamente de un pensamiento personal pasajero. El proyecto mostró, de una manera gaiana, cómo un pensamiento puede convertirse en un acto que conlleva un beneficio personal y local.

Nuestro puente está hecho de acero, fue construido por un herrero, Gilbert Rendall, y en todos los aspectos es una construcción mecánica. No me siento completamente a gusto con las cosas mecánicas. Recuerdo una conversación con mi amigo Stuart Brand, editor de *CoEvolution Quarterly*, y Gary Snyder, el poeta. Estaban sorprendidos e indignados cuando dije «las sierras mecánicas son un invento más perverso que la bomba de hidrógeno». Para mí una sierra mecánica es algo que corta en un tiempo de minutos algo que ha tardado cientos de años en crecer. Era el sistema de destruir las selvas tropicales. Para Gary Snyder era una herramienta de jardín benigna con la que podía, como un practicante, eliminar cuidadosamente las llagas de años de mala agricultura en su bosque. No es lo que se hace sino el modo como se hace; cuanto más poderosa es la herramienta más difícil es su uso.

El lector puede preguntarse cómo tenemos que vivir con Gaia según estos pensamientos dispersos. Contestaré que, como en una metáfora, Gaia acentúa fundamentalmente la importancia del organismo individual. Siempre es como consecuencia de la acción de individuos que evolucionan potentes sistemas locales, regionales y globales. Cuando la actividad de un organismo favorece el medio ambiente al mismo tiempo que al mismo organismo, entonces se extiende y es favorecida y finalmente el organismo y el cambio

ambiental asociado a él adquirirán una extensión global. También es cierto a la inversa, y cualquier especie que afecta al medio ambiente de forma dañina es condenada, aunque la vida continúa. ¿Es ello aplicable ahora a la humanidad? ¿Estamos condenados por la destrucción de nuestro mundo natural? Gaia no es intencionadamente antihumana, pero cuanto más tiempo continuemos cambiando el medio ambiente global contra sus preferencias animamos nuestra sustitución por otra especie más ambientalmente decente.

Todo depende de usted y de mí. Si contemplo el mundo como un organismo vivo del que somos parte -no los propietarios ni los usufructuarios, ni tan siquiera unos pasajeros- podríamos tener mucho tiempo por delante de nosotros y nuestra especie podría sobrevivir dentro de su «tiempo asignado». Es una cuestión nuestra actuar de manera constructiva. El frenesí presente de agricultura y silvicultura es un ecocidio global tan tonto como sería actuar con el concepto de que nuestros cerebros son supremos y las células de los demás órganos desechables.

¿Excavaríamos pozos a través de nuestra piel para extraer sangre por sus nutrientes? Si vivir con Gaia es una responsabilidad personal, ¿cómo podemos hacerlo? Cada uno de nosotros tiene una respuesta personal al problema. Tiene que haber sistemas más simples de vivir con Gaia que el que nosotros hemos escogido en Coombe Mill. Encuentro útil pensar en cosas que son inocuas con moderación pero malignas en exceso. Para mí se encuentran estas tres “c” mortales: coches, ganado y motosierras (cars, cattle, chain saws, en inglés). Por ejemplo, uno podría comer menos ternera. Si se hace, y los médicos tienen razón, la salud de uno puede mejorar, y al mismo tiempo se disminuye la presión para convertir los bosques en granjas de ternera absurdamente despilfarradoras.

La teoría de Gaia surgió a partir de la visión distante y extraterrestre de la Tierra, demasiado distante para preocuparse por la gente. Sorprendentemente, la visión no es incoherente con los valores humanos de amabilidad y compasión. En realidad, nos ayuda a rechazar el sentimentalismo acerca del dolor y la muerte, y a aceptar la mortalidad para nosotros así como para nuestra especie. Con semejante impresión en la mente, Helen y yo deseamos que nuestros

ocho nietos hereden un planeta saludable. De algún modo, el destino peor que podemos imaginar para ellos es que gracias al progreso de la medicina se vuelvan inmortales: condenados a vivir en un planeta geriátrico, con la tarea inacabable y abrumadora de siempre mantenerlo y mantenerse vivos y adaptado a nuestro estilo de vida. Muerte y desmoronamiento son inevitables pero constituyen un precio pequeño que pagar por la posesión, aunque breve, de la vida como individuo. La segunda ley de la termodinámica indica que la única manera de que el universo pueda funcionar es hacia abajo, encaminándose hacia una muerte por enfriamiento. Los pesimistas son aquellos que utilizan una linterna para ver su camino en la oscuridad y esperan que la batería dure para siempre. Lo mejor es vivir como recomendó Edna St. Vincent Millay:

Mi vela arde por los dos cabos,
No durará toda la noche,
pero, ah, mis enemigos y oh, mis amigos,
Proporciona una luz encantadora.



REFERENCIAS Y LECTURAS ADICIONALES

Referencias

- Hutton, James, 1788. "Theory of the Earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe." Roy. Soc. Edinburgh Tr., 1 209-304.
- Doolittle, W.F. 1981. "Is Nature Really Motherly?" *CoEvolution Quarterly* 29 58-63.
- Hollánd H.D. 1984. *The Chemical Evolution of the Atmosphere and the Oceans*. Princeton, Princeton University Press 539.
- Lovelock, J.E. 1972. "Gaia as Seen through the Atmosphere." *Atmospheric Environment* 6 579-80.
- Lovelock, J.E.; Maggs, R.J.; y Rasmussen, R.A. 1972. "Atmospheric Dimethyl Sulphide and the Natural Sulphur Cycle." *Nature* 237, 452-53.
- Margulis, L., y Lovelock, J.E. 1974. "Biological Modulation of the Earth's Atmosphere." *Icarus* 21 471-89.
- Charlson R.J.~ Lovelock J.E.; Andreae, M.O.; y Warren S.J. 1987. "Ocean Phytoplankton, Atmospheric Sulfur, Cloud Albedo and Climate." *Nature* 326 665-61.
- Whitfield, M., y Turner, David R. 1987. "The Role of Particles in Regulating the Composition of Seawater." en *Aquatic Surface Chemistry*, ed. Werner Stumm. Chichester, Wiley.

1.- Introducción

Para disponer de una visión alternativa del trabajo en el Jet Propulsion Laboratory, ¿qué mejor que leer *The Search for Life on Mars* de Henry Cooper (Holt, Rinehart and Winston, Nueva York, 1976)?

2.- ¿Qué es Gaia?

Un libro hermoso y completamente comprensible acerca de la entropía es el de P.W. Atkins, *The Second Law*, Freeman, Nueva York y Londres, 1986. La descripción clásica del problema de la definición de vida es *Qué es la vida* por Erwin Schrödinger, escrito en Dublín durante la segunda guerra mundial (Cambridge: Cambridge University Press, 1944 y versión española en Tusquets Editores, *Metatemas 1* Barcelona, 1988).

El libro más ligero de Ilya Prigogine sobre el difícil tema de la termodinámica de los procesos irreversibles es *From being to becoming* (Freeman, San Francisco, 1980).

Para un relato directo de la evolución de la Tierra desde el punto de vista de los geólogos, no hay mejor libro que *The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans* de H.D. Holland (Princeton University Press, Princeton, N.J. 1984).

Un libro similar de climatología es *The Coevolution of Climate and Life* de Stephen Schneider y Randi Londer (Sierra Club Books, San Francisco, 1984).

3.- Explorando el mundo de las margaritas

Aquellos interesados en la teoría geofisiológica deberían leer el libro clásico de Alfred Lotka *Elements of Physical Biology* (Williams and Wilkins, Baltimore, 1925).

La autopoyesis, la organización de las cosas vivas, y muchos otros conceptos útiles para la comprensión de la vida como un proceso,

se describen en *The Tree of Knowledge*, por Humberto R. Maturana y Francisco J. Varela (New Science Library, Boston, 1987). Existe versión española: *El árbol del conocimiento*, Debate, Madrid, 1990.

4.- El Arcaico

Para aquellos interesados en la síntesis de los elementos dentro de las estrellas y acerca de la vida de las estrellas en general, existe una descripción espléndida de estos sucesos asombrosos en el libro de Sir Fred Hoyle *Astronomy and Cosmology* (Freeman San Francisco, 1975).

En *Earty Life* Lynn Margulis proporciona una descripción hermosa y claramente escrita de lo conocido y lo supuesto del período oscuro antes y después de que empezase la vida, incluyendo un retrato de la evolución de la vida incipiente (Science Books International, Boston 1982).

Si el lector está interesado en los orígenes, entonces puede leer *Origins of Life* de Freeman Dyson (Cambridge University Press, Cambridge, 1986. Una reelaboración posterior en su libro, traducido al castellano, *El infinito en todas direcciones*, Tusquets, Metatemas 25, Barcelona, 1991) y *Origins: A Skeptic Guide to the Creation of Life on Earth*, Robert Shapiro (Summit, Nueva York, 1986). Existe versión española: *Orígenes, Lo que sabemos actualmente del origen de la vida*, Salvat Barcelona, 1989.

Un texto geológico raro que restituye el alma del nebuloso mundo arcaico es el libro de E.G. Nisbet, *The Young Earth* (Allen and Unwin, Londres, 1986).

El trabajo de algunos de los pioneros en el nuevo campo de la biomineralización se describe en *Biomineralization and Biological Medical Accumulation* de P. Westbroek y E.W. de Jong (Reidel Dordrecht 1982).

Para aquellos interesados en la evolución de las células eucariotas, existe una descripción detallada en el libro de Lynn Margulis *Symbiosis in Cell Evolution* (Freeman San Francisco, 1981).

Una descripción espléndida de los cuatro eones de evolución desde nuestros ancestros microbianos se encuentra en el libro de Lynn Margulis y Ron Sagan, *Microcosmos* (Simon and Schuster, Nueva York, 1986).

6.- Tiempos modernos

Una parte importante de la teoría de Gaia proviene de los datos acerca de la atmósfera y la química atmosférica. Un libro que resume los datos acerca de este tema de manera legible es *Chemistry of the Atmospheres* de Richard P. Wayne (Oxford University Press, Oxford, 1985).

Para una descripción profesional basada en los criterios convencionales se puede recomendar *The Planets and Their Atmospheres* de John S. Lewis y Ronald G. Prinn como un antídoto para Gaia (Academic Press, Orlando, Fla., 1984).

7.- Gaia y el medio ambiente contemporáneo

Las actas de la reunión de Brasil mencionada en este capítulo se han publicado ahora en forma de libro, *The Geophysiology of Amazonia*, editado por Robert E. Dickinson (Wiley Nueva York 1987).

Una descripción de las batallitas de los clorofluorocarbonos se encuentra en *The Ozone War*, por Lydia Dotto y Harold Schiff (Doubleday, Nueva York, 1978).

Rachel Carson queda, como Marx, como la mayor influencia después de la revolución, esta vez en pensamiento y acción ambiental. Su libro seminal *Silent Spring* (Houghton Mifflin, Boston, 1962) debe incluirse en cualquier lectura adicional sobre los temas tratados en este capítulo. Existe versión española, *Primavera silenciosa*, Caralt, Barcelona 1964.

Los asuntos ambientales se encuentran en el dominio de la política, y para una descripción juiciosa y comprensible desde esta perspectiva se puede leer *Climatic Change and World Affairs*, por Sir Crispin Tickell (LIniversity Press of America, Lanham Md., 1986).

Una figura entre los científicos ambientales es Paul R. Erlich, su libro con Anne H. Erlich, *Population Resources Environment*, es de lectura imprescindible para conocer el corazón y el pensamiento del movimiento ecologista (Freeman Nueva York, 1972).

Un punto de vista contemporáneo de los problemas ambientales se muestra en *Sustainable Development of the Biosphere*, editado por William C. Clark y R.F. Munn (Cambridge University Press, Cambridge, 1986).

8.- El segundo hogar

Si uno realmente quiere saber a qué se parece la superficie de Marte, no hay mejor fuente que el texto descriptivo y las fotografías del bello libro de Michael Carr, *The Surface of Mars* (Yale University Press, New Haven y Londres, 1981).

9.- Dios y Gaia

Un punto de vista teológico de Gaia se muestra en el libro de Hugh Montefiore, *The Probability of God* (SCM Press Londres 1985).

Un libro inusual y fácil de leer es *God and Human Suffering* de Douglas John Hall (Augsburg, Minneapolis, 1986). Aunque no está directamente relacionado con Gaia lo encontré útil y conmovedor cuando revisé este capítulo.

Para mí, el libro más importante en relación con este capítulo es *Angels Fear: Towards an Epistemology of the Sacred* de Gregory Bateson y Mary Catherine Bateson (MacMillan, Nueva York, 1987). Existe versión española: *Temor de los ángeles*, Gedisa, Barcelona, 1989.

Para una comprensión del punto de vista de los científicos sobre el universo, quizás el mejor resumen se encuentra en *The Self-*

Organization Universe de Erich Jantsch (Pergamonn, Oxford 1980).

Un tema a menudo ligado con Gaiá pero que de hecho es muy diferente es The Anthropic Cosmological Principle de John D. Barrow y Frank J. Tipler (Oxford University Press, Oxford, 1986).

General

Para los que encuentran el tema de Gaia entretenido, probablemente nadie ha escrito con más sentimiento que Lewis Thomas en sus abundantes libros, en particular The Lives of a Cell (Viking Press, Nueva York, 1975; versión española: La vida de las células, Ultramar, Barcelona, 1990) y The Youngest Science (Viking Press Nueva York, 1983).

Ninguna guía del mundo sería completa sin un atlas, y el más apropiado sería Gaia: An Atlas of Planet Management, editado por Norman Myers (Doubleday, Nueva York 1984).

La evolución de la Tierra desde el punto de vista de un geólogo se describe de forma clara y bellamente ilustrada por Frank Press y Raymond Siever en Earth (Freeman, San Francisco, 1982).

Para una visión desde la perspectiva de los Físicos de la evolución del Cosmos y de la Vida, véase el libro de Eric Chaisson The Life Era (Atlantic Monthly Press, Nueva York, 1987).

Y para una visión preponderantemente ecológica acerca de la Tierra escrita al mismo tiempo aunque en gran contraste de pareceres con la visión expresada en el primer libro de Gaia, recomiendo encarecidamente el libro de Paul Colinvaux, Why Big Fierce Animals Are Rare? (Princeton University Press, Princeton, N.J., 1978). Versión española, ¿Por qué son escasas las fieras?, Orbis, Barcelona, 1987.

El mundo de los científicos que han participado en los descubrimientos registrados en este libro se encuentra recogido en *Planet Earth*, por Jonathan Weiner (Bantam Books, Nueva York, 1986).