TRABAJO CURSO DE DOCTORADO

Nereida Melguizo Ruiz

ANÁLISIS DE PROCESOS EVOLUTIVOS

..."Hemos heredado de nuestros antepasados el anhelo profundo de un conocimiento unificado y universal. El mismo nombre, dado a las más altas instituciones de enseñanza, nos recuerda que, desde la Antigüedad y a través de los siglos, el aspecto universal de la ciencia ha sido el único que ha merecido un crédito absoluto. Pero la propagación, tanto en profundidad como en amplitud, de las múltiples ramas del conocimiento humano durante los últimos cien años nos ha enfrentado con un singular dilema. Por un lado, sentimos con claridad que sólo ahora estamos empezando a adquirir material de confianza para lograr soldar en un todo indiviso la suma de los conocimientos actuales. Pero, por el otro, se ha hecho poco menos que imposible para un solo cerebro dominar completamente más que una pequeña parte especializada del mismo. Yo no veo otra escapatoria frente a ese dilema (si queremos que nuestro verdadero objetivo no se pierda para siempre) que la de proponer que algunos de nosotros se aventuren a emprender una tarea sintetizadora de hechos y teorías, aunque a veces tengan de ellos un conocimiento incompleto e indirecto, y aun a riesgo de engañarnos a nosotros mismos"...

Erwin Schrödinger

Comenzaré citando un simple argumento que generosamente disculpe la situación actual de la ciencia. La mente humana divide y clasifica procesos con el fin de entenderlos, tiende a facilitarse el trabajo reduciendo la extensión con la que afronta las informaciones. Es más sencillo. Sin embargo, hay que entender que los sucesos que trata de explicar la ciencia reduccionista se encuentran inmersos en una intrincada red, carente de sentido al ser analizada a pedazos.

Por otra parte, un investigador busca en los datos lo que le pasea por la mente, y sus interpretaciones son indisociables del camino que le marca el pensamiento. Debido a que las interpretaciones de los datos y conocimientos están a veces, ocasionalmente, o más bien en la mayoría de los casos sujetas a la visión de aquel que los analiza y estudia, son ciertos únicamente en un tiempo limitado y para un determinado sector científico. De esto se desprende la necesidad de una continua revisión de los pilares de la ciencia y de ganas de considerar nuevas teorías, nuevas aportaciones que se ajusten más a lo que observamos a nuestro alrededor.

En el otro extremo del problema se encuentra el contexto en que se enmarca la ciencia moderna, el sistema político, social y cultural que la moldea, dirige y limita. Es indudable que el dinero guía la trayectoria que sigue la investigación científica, y de esta forma aquellos logros que mimeticen y apoyen el sistema en que vivimos gozan de una posición privilegiada. Esto hace que veamos a la Naturaleza bajo el prisma de la competencia y la selección del más apto, que son casualmente los principales fundamentos de la economía liberal impuesta en nuestra “moderna” parte del planeta. Los principios de nuestra sociedad quedan en conjunto justificados de la manera más “natural”, ya que si demostramos que los procesos biológicos que explican la *vida* son aleatorios y competitivos, y sus elementos constituyentes “máquinas” rivales que sólo buscan la propagación de sus genes en detrimento de todo lo demás, entonces la manera en que vivimos y nos integramos en el mundo se torna desafinante y mísera, pero convenientemente argumentada.

... la buena noticia es que la *vida* es mucho más que todo eso, no el simple fruto de malvadas moléculas que luchan cruelmente por perpetuarse y destruir sin más todo aquello que las rodea. Los organismos que forman parte de la llamada “ecosfera” no luchan entre sí, sino todo lo contrario: actúan como un todo integrado e indivisible, con una única y última misión, la de mantener el orden crítico de la jerarquía de sistemas de la que forman parte, es decir la de mantener la estabilidad de *Gaia*.

I. Gaia

"Asumamos que la Tierra se autorregula; que sobre nuestro planeta, los organismos, las rocas, el aire y el océano actúan al unísono para mantener confortable el clima y la composición atmosférica. No estoy pidiendo que se deje de lado la ciencia y se crea en una misteriosa Madre Tierra con poderes teleológicos. Todo lo que pido es que se imagine el planeta como un ecosistema, Gaia, que surgió cuando los organismos y el entorno evolucionaron conjuntamente. ¿Por qué hacerlo de esta manera? Simplemente porque nuestro lugar, como una de las muchas especies de este planeta, se aprecia con más claridad si observamos la Tierra en su conjunto y no las partes subdivididas de la misma. Además, creo que esos viajes fuera de la Tierra, hace 30 años, constituyeron uno de nuestros mayores logros. Nos hicieron ser conscientes, por primera vez, de que nuestro mundo era realmente finito y pudimos apreciar qué maravilloso y diferente era en comparación con los planetas hermanos Marte y Venus, yermos y sin vida".

James Lovelock

Antecedentes: ¿de dónde surge la Hipótesis de Gaia?

James Lovelock, doctor en medicina y reputado científico independiente, fue invitado en 1961 por la NASA para participar en los experimentos de búsqueda de *vida* en Marte (primera misión lunar Surveyor). Lovelock era especialista en diseñar y fabricar instrumentos analíticos de gran sensibilidad, de manera que su tarea consistía, junto al resto del equipo, en tratar de hallar un método de detección que pudiese arrojar respuestas a la cuestión de si existía *vida* en nuestro planeta vecino. Al contrario que sus compañeros, Lovelock no tardó en darse cuenta del verdadero desafío: ¿cómo buscar *vida* sin saber qué tipo de *vida* se busca? Su escepticismo hacia las propuestas de sus colegas biólogos -basadas en la suposición de que la vida marciana debía ser igual o similar a la terrestre- llevó a Lovelock a ser retado y ofrecer un sistema de detección de vida viable. Fue entonces cuando planteó la posibilidad de analizar la química atmosférica de Marte, cuyo resultado podría revelar la presencia o ausencia de cualquier tipo de vida allí. Como veremos más adelante, un planeta habitado exhibiría una

atmósfera alejada del equilibrio termodinámico, mientras que en uno carente de vida la atmósfera vendría determinada por la física y la química, y su composición se hallaría muy cercana al equilibrio. Así, un simple análisis químico podría, sin grandes costes ni complicados aparatos de medición, sin necesidad de misiones espaciales de exploración, discriminar entre la presencia o ausencia de vida. Los intereses económicos de la NASA iban evidentemente más allá del simple descubrimiento de vida en Marte; no es objeto de este trabajo de manera que no me detendré más en ello, pero Lovelock fue duramente criticado por su propuesta. Sólo Dian Hitchcock accedió a examinar la atmósfera marciana mediante astronomía por infrarrojos junto a él. Los resultados de sus investigaciones mostraron grandes diferencias al compararse con aquellos obtenidos de la atmósfera terrestre. La atmósfera de Marte se encuentra muy próxima al equilibrio químico, mayoritariamente dominada por dióxido de carbono y pocas cantidades de nitrógeno y oxígeno. En el otro extremo, la Tierra con sus 'anomalías químicas' características de un planeta 'vivo'. Su atmósfera no es el simple resultado de la física y la química fundamentales; el oxígeno, el nitrógeno y el metano, unido a la sola presencia de trazas de dióxido de carbono anuncian la inequívoca presencia de sistemas abiertos que incrementan su organización a expensas del aumento de entropía del entorno. Trataremos el tema de la termodinámica de la vida en apartados posteriores; el caso es que el análisis químico de ambos planetas y su comparación llevó a Lovelock a preguntarse cómo podía la atmósfera terrestre mantenerse estable, en un estado 'tan alejado' del equilibrio. Algo debía actuar como regulador químico, como agente estabilizador responsable del no-equilibrio que reina en nuestro planeta. La idea de un sistema complejo capaz de autorregularse, involucrando tanto lo abiótico como lo biótico, resultó en la noción de ecosistema planetario, que culminaría con la hipótesis de Gaia.

“Considero la Tierra como un superorganismo cuyo adecuado estudio debería correr a cargo de la fisiología”.

James Hutton, 1795

¿Qué supone Gaia?

Como bien subraya Lovelock, la idea de Gaia no es nueva, ya a finales del siglo XVIII el geólogo James Hutton intuía que la evolución de nuestro planeta conllevaba leyes naturales más allá de las aplicables a lo inerte. La hipótesis de Gaia une inexorablemente lo biótico con lo abiótico, la vida con el ambiente.

A pesar de lo que pueden pensar algunos -entre los cuales me incluyo- Lovelock insiste en que su hipótesis no excluye la visión darwiniana de la evolución por Selección Natural y en su afán por evitar el misticismo, dedica gran parte de su argumentación a demostrar cómo la autorregulación a escala planetaria nada tiene de ‘consciente’, la vida construye activamente su medio de forma absolutamente automática e involuntaria.

Como explicaré más adelante, creo que la visión gaiana se opone firmemente a la teoría evolutiva de supervivencia diferencial y pasiva; implica que los seres vivos emplean su

creatividad en hacer de su entorno un lugar idóneo para su supervivencia. Es evidente, al menos en mi opinión, que la hipótesis de Gaia desecha la pasividad y la Selección Natural como motores evolutivos, pues recalca la propiedad emergente, inherente a cualquier sistema vivo, de plasticidad y capacidad de crear originales formas estables que se mantienen en el tiempo.

La evolución global de todo un planeta parece plantear serias complicaciones teóricas para gran número de científicos. En realidad la práctica nos enseña que, a pesar de la lógica dificultad que conlleva el estudio de cualquier sistema complejo, existen numerosas evidencias para pensar que los seres vivos evolucionan coordinadamente, integrados en el medio abiótico donde se desarrollan. Con esto me refiero a que los organismos no responden pasiva y aisladamente al ambiente, sino activamente, completamente embebidos en él.

Pero, ¿qué implicaciones tiene la hipótesis de Gaia? Lovelock la ha hecho célebre aunque poco aplaudida, tal vez debido a su tímida posición, en ocasiones contradictoria. En mi opinión, la idea de un superorganismo estable a escala planetaria mantenido y regulado activamente por la vida constituye un cambio de paradigma de enorme relevancia; el punto de vista elegido es diametralmente opuesto al reduccionismo científico que viene dominando la visión e interpretación de la Naturaleza en los últimos siglos.

"Así como el caparazón es parte del caracol,
las rocas, el aire y los océanos son parte de Gaia"

James Lovelock

Demostrando Gaia

Hablaré muy sucintamente de algunas evidencias que apoyan la hipótesis de Gaia, y que requieren de una mayor consideración a la luz de las limitaciones de la 'moderna' teoría sintética.

Comencemos por la regulación del clima, más concretamente la de la temperatura global de nuestro planeta. Durante largos periodos de tiempo, la temperatura de la Tierra es mantenida en un rango adecuado para la vida y regulada a través de la actividad de los organismos. Schwartzman y Volk (1989) demostraron experimentalmente cómo los seres vivos han modificado y regulado la temperatura global desde su aparición hasta nuestros días, alterando la química terrestre y evolucionando con ella. Cuando las temperaturas bajan, los organismos del suelo se desarrollan más lentamente y por tanto su bombeo de dióxido de carbono es menor; esto hace que la concentración atmosférica de dióxido de carbono aumente, al tiempo que el planeta se calienta. Al aumentar la temperatura, los organismos crecen cada vez más rápido, se acelera el bombeo de dióxido de carbono y la Tierra se enfría. Este proceso de regulación permite estabilizar la temperatura terrestre durante largos periodos a pesar del incremento de calor solar en un 25 % desde el inicio de la vida: los organismos del suelo actúan como agentes estabilizadores controlando el exceso de dióxido de carbono atmosférico y por tanto, el clima.

Consideremos ahora la regulación de otros gases atmosféricos, como el oxígeno. A pesar de no ser el gas más abundante, domina nuestra atmósfera y establece el potencial químico de nuestro planeta (la importancia de este tipo de gradientes se discute en el apartado sobre termodinámica). Como componente funcional del sistema activo que constituye Gaia, el oxígeno ha de estar sujeto a una sólida regulación. La actual

concentración atmosférica de O_2, necesaria para la supervivencia de la inmensa mayoría de animales, evidencia este hecho; si fuese menor, tales organismos desaparecerían, al igual que muchos otros que dependen de ellos; asimismo, nunca podría haber sido más alta, ya que un pequeño incremento del 1% aumentaría la probabilidad de incendio en un 60%. La concentración de oxígeno 'se mantiene' en 21% constante, dentro de los límites en que permite la viabilidad de la biosfera y su entorno (en Bateson et al., 1987). El ciclo de este gas se halla estrechamente unido al del carbono, siendo imposibles de estudiar por separado (véase más adelante, fig. 2). Así, la producción de oxígeno viene determinada por la deposición de carbono, lo cual depende a su vez de los productos proporcionados por los organismos fotosintéticos. Si analizamos los efectos del oxígeno sobre los fotosintetizadores, y los de estos últimos sobre la abundancia del gas (fig. 1) veremos cómo la intersección de ambas curvas corresponde al nivel de O_2 en que el sistema se encuentra regulado. No obstante, no debemos olvidar que todos los ciclos de materia y energía involucrados en Gaia están acoplados y son por tanto interdependientes, y es por ello complicado llegar a conclusiones claras tratándolos por separado. De esta forma, el resto de gases atmosféricos exhibe comportamientos similares, con funciones a la vez reguladoras y reguladas.

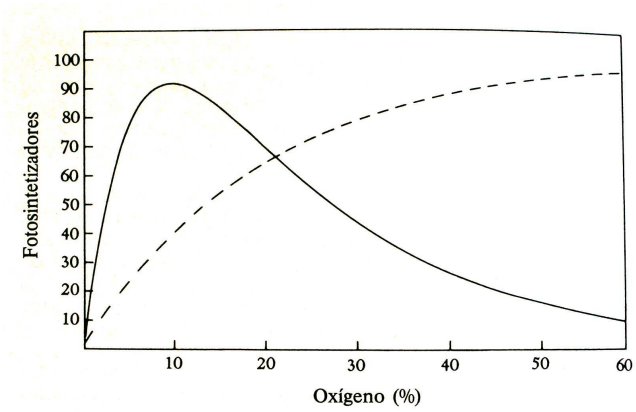

Fig. 1 Efecto del O_2 en el crecimiento de los organismos (línea continua) y efecto de la presencia de organismos en la abundancia de O_2 (línea a trazos) Lovelock 1988.

La constancia de la salinidad es otra evidencia que apoya la hipótesis de Gaia. Pocos seres vivos toleran salinidades superiores al 6% en peso y sorprendentemente, la concentración salina de nuestros océanos se ha mantenido siempre por debajo de ese límite... ¿al azar?

Si bien es cierto que la salinidad de los océanos es, para la gran mayoría de organismos marinos, más alta que su medio interno, también es verdad que cuentan con ingeniosos medios para contrarrestar el gradiente. Es interesante porque, como en el caso del oxígeno, los niveles de sal se mantienen dentro de un rango crítico aceptable para los seres vivos, lo cual resulta difícil de explicar considerando aisladamente la vida y su

entorno. Desde la litosfera, la sal se acumula en los océanos a lo largo del tiempo, y de no ser por los propios seres vivos, su aumento resultaría letal para la persistencia de la vida en la Tierra. Parte de la sal es depositada en lechos evaporíticos y enterrada por sedimentación; los depósitos calizos son en su mayoría producto de la actividad de microorganismos que precipitan carbonato cálcico, formando y manteniendo esas lagunas y por tanto haciendo de los océanos un entorno apto para la vida (Lovelock, 1988).

Tal vez no sea adecuado hablar de regulación aquí, y la vida en la Tierra haya persistido desde el momento en que apareció por puro azar y algo de suerte a su favor. Algunos autores reconocen que no existen evidencias para rechazar la hipótesis del azar en el mantenimiento de la vida desde su aparición hasta ahora, mientras otros apoyan la idea de que un planeta con vida es más resistente a las perturbaciones y que dicha regulación se acumula e incrementa en el tiempo (Lenton 2002). No obstante, la posibilidad de que el asteroide 433 Eros colisione con nuestro planeta en los próximos 102–103 millones de años es del 50% (Michel et al., 1996), pudiendo esterilizar su superficie y acabando con cualquier resquicio de vida aquí. Si bien es cierto que la estocasticidad puede provocar el colapso de Gaia tal y como sugieren algunos autores, es evidente que el sistema es flexible, adaptativo. Sabemos que la resistencia de este sistema (la fuerza de Gaia) es enorme,

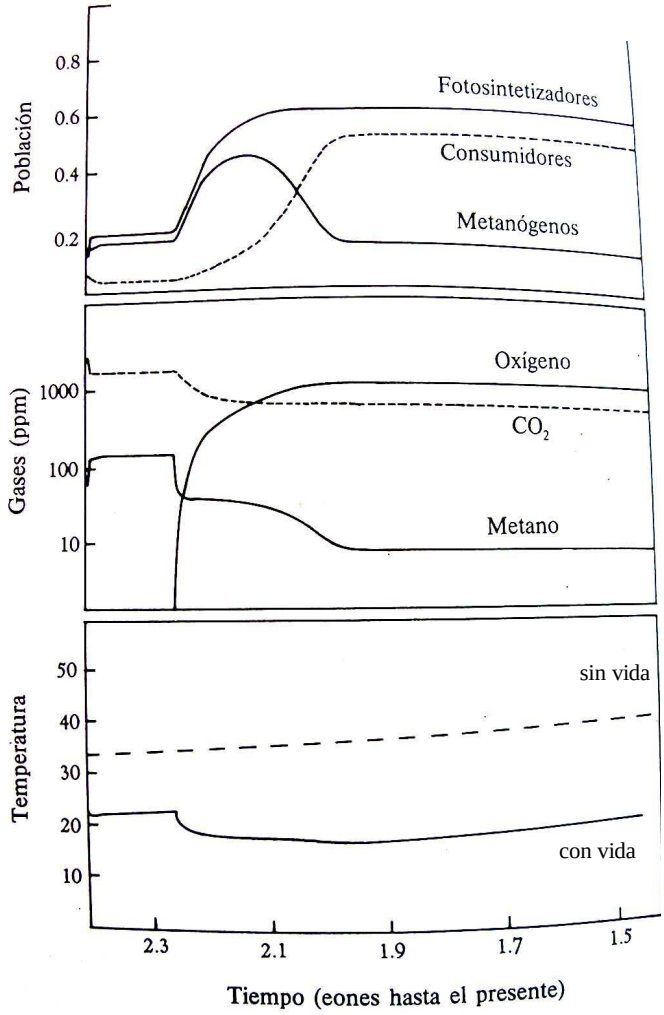

Fig. 2 Modelo de la transición del Arcaico al Proterozoico Lovelock 1988

hecho evidenciado por la persistencia de la vida a lo largo del tiempo a pesar de que nuestro planeta ha sufrido decenas de brutales impactos por parte de asteroides a intervalos regulares de unos 100 millones de años. Tal y como defiende Lovelock, si Gaia fuese frágil no hubiese podido recuperarse ante tales eventos, y menos responder a ellos con una abrumadora creatividad de nuevas formas y funciones.

Las regulaciones climática, atmosférica y salina son algunas de las evidencias de la homeostasis gaiana, no me detendré más en este tema. La figura 2 resume algunas de las ideas descritas en este apartado, mediante un modelo propuesto por Lovelock en su libro *Las edades de Gaia*.

Lo realmente importante es contemplar a Gaia como un sistema vivo integrado y estable, de manera que toda interpretación acerca de sus elementos constituyentes quede enmarcada en el contexto de un todo global. La ciencia sistémica que deriva de este pensamiento da prioridad a las interacciones y no a los individuos, estudia los nexos en vez de los nodos, integra funciones en lugar de diseccionarlas. Si vemos a Gaia como un superorganismo, cada uno de sus sistemas vitales estaría representado por un ecosistema, los 'órganos' estarían formados por las distintas comunidades ecológicas que lo componen, los tejidos serían las especies, y finalmente, los organismos junto con su entorno inmediato harían el papel de células embebidas en el ambiente.
¿qué relevancia podría tener entonces la competencia? ¿cuál sería el papel de la selección? ¿son unas células más aptas que otras? ¿y los tejidos? ¿acaso podemos demostrar la función de un órgano por medio de la supervivencia de aquellos más capaces?
La estructura en red de redes que constituye Gaia hace imposible su análisis por partes, o al menos dificulta su comprensión desde la misma base, pues es la coordinación y la subyacente homeostasis lo realmente determinante, y por tanto lo primero que debemos explicar. Me gustaría asimismo proponer, tal y como comento en posteriores apartados, la idea de desarrollo gaiano, de tal forma que no se trate sólo de considerar a Gaia como un superorganismo, sino además de inferir en la dinámica de sus ecosistemas el desarrollo de un ser vivo. Así, su crecimiento constaría de una larga cadena de fases sucesivas, remodelaciones que nada tienen que ver con selecciones ni eficacias. La sustitución de subsistemas a todos los niveles (desde células hasta ecosistemas) no es más que el reflejo del desarrollo espaciotemporal de una red, en ocasiones sometida a

impactos a gran escala que inducen su metamorfosis, y no una supervivencia diferencial de individualidades inconscientes, competitivas y aisladas. De hecho, la extinción de una comunidad, especie o población por causas ‘no naturales’ acarrea en la mayoría de los casos una lesión ecosistémica tan difícil de sanar como el arrítmico bombeo de sangre de un corazón infartado. Cada una de las células de un riñón, un hígado o un corazón es igualmente necesaria, pues cumple una función. De la misma manera, cada especie realiza una tarea en el ecosistema en el que vive, y esencial es por tanto su existencia. Si el sistema funciona gracias a la perfecta coordinación de sus ‘módulos’; resultaría interesante investigar la naturaleza de las relaciones subyacentes a esta regulación. Sin una ajustada coevolución de todos sus componentes, Gaia colapsaría: lo que vemos no es fruto del azar, sino del propósito. La teleología, aquí, nada tiene que ver con el concepto antropocéntrico de voluntad consciente, sino más bien con el propósito inherente a cualquier sistema complejo, integrado por multitud de intrincados subsistemas biológicos: perpetuarse de manera estable en el tiempo.

II. La termodinámica de la vida

No-equilibrio y sistemas complejos

La Naturaleza tiene múltiples caras, tan distintas entre sí como diferentes son los ojos que la contemplan. La mirada termodinámica es certera, aún aislada, pero universal. Para tratar de comprender mejor qué se supone que representa la vida y cuál es su funcionamiento recurriré a esta ciencia, pero sólo como una tímida aproximación a la integración de ideas arrancadas de otras disciplinas, sin pretender con ello nada más que aportar otra perspectiva al estudio que nos ocupa.

Gracias a la termodinámica sabemos que los seres vivos son sistemas complejos, estructuras disipativas que incrementan su organización a expensas del aumento de entropía en el medio, es decir que crean orden interno exportando desorden al exterior.
La Naturaleza exhibe complejos comportamientos capaces de generar todo aquello que vemos y somos, inventando formas y funciones a partir de flujos de energía.

Sistemas disipativos metaestables

La entropía termodinámica es una medida temporal de la distribución de la energía, un registro de la incertidumbre contenida en un sistema. A más entropía, más desorden y aleatoriedad. Los sistemas abiertos presentan una serie de características fundamentales y maravillosas, como la capacidad de disminuir su entropía interna como respuesta a un exceso de energía entrante, es decir que este tipo de sistemas puede generar estructuras complejas que disipan el gradiente al cual se ven sometidas. Mientras que en un sistema cerrado crece irremediablemente la entropía y las partículas se acaban distribuyendo al azar, en uno abierto el desorden puede minimizarse mediante la organización de sus componentes elementales. Los sistemas biológicos, disipativos y metaestables, exhiben una complejidad de la cual subyacen propiedades emergentes no predecibles, como la auto-organización y la auto-regulación.

Veremos cuál es el origen termodinámico de las estructuras biológicas, y cómo evolucionan a lo largo del tiempo, esta vez bajo la mirada de la física y la química de lo complejo, la termodinámica.

Disipando gradientes

El principio de Le Châtelier, también conocido como "principio de moderación" (Prigogine, 1955), se refiere al proceso mediante el cual todo sistema en equilibrio termodinámico tenderá a oponerse a alteraciones en los factores de los cuales depende su estado. Así, un sistema apartado del equilibrio, alimentado por un continuo fluir de energía externa, responde disipando los gradientes a los cuales se ve sometido. La expresión de esa respuesta es estructura, forma, organización.

En la Naturaleza, los sistemas disipativos generan estructuras a partir de la reducción de gradientes, originando orden mientras exportan desorden en forma de residuos al exterior. Un ejemplo de ello son los llamados hexágonos o células de Bénard. El físico Henri Bénard consiguió generar 'células' hexagonales no-vivas, sometiendo una fina capa oleosa de un milímetro de espesor a un gradiente térmico de 80ºC (véase fig.3). El experimento consistía en calentar el fondo de un recipiente de latón que contenía aceite de esperma de ballena. La superficie en contacto con el ambiente se encontraba a unos 20ºC, mientras la base se hallaba próxima a los 100ºC. Por simples procesos físicos surgían formas hexagonales ordenadas, y es que la convección disipa calor a través de ciclos organizados: el aceite calentado desde abajo ascendía a la superficie por la región central de cada hexágono, enfriándose a medida que contactaba con el ambiente y descendiendo por la periferia. Estos ciclos se mantenían de manera estable mientras perdurara la alteración, es decir mientras el sistema siguiese sometido al gradiente térmico. Crear sistemas complejos exportando caos molecular al medio es un comportamiento intrínseco a la Naturaleza, frecuente tanto en lo 'vivo' como en lo que

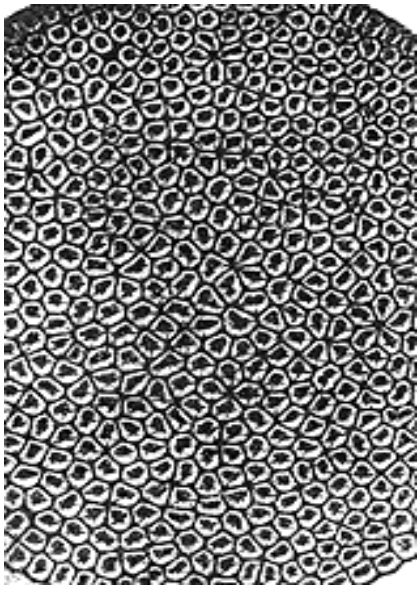

Fig. 3 Células de Bénard

llamamos inerte. Cuanto más organizado, más ordenado y coherente es un sistema, más eficaz se torna su producción de desechos y más completa la degradación del gradiente que lo nutre.

A pesar de la aparente ‘facilidad’ con la que se crean estas estructuras disipativas, su emergencia, estabilidad y persistencia en el tiempo requiere de ciertas condiciones. Existen restricciones, en este caso un umbral crítico e intervalos de temperatura en los cuales es viable la generación de celdas hexagonales.

No obstante, si las condiciones son favorables y disponen de materia suficiente en su entorno circundante, los ciclos nacen del no-equilibrio, perduran en el tiempo y son capaces de crecer en complejidad, llegando a adquirir la capacidad de regular los gradientes de los que dependen. Es la propiedad emergente conocida como homeostasis, definitoria de sistemas disipativos estables como los organismos vivos. Así empezó sin duda la fisiología, y como veremos más adelante, la autorregulación a todos los niveles: desde nuestras células hasta la Tierra, los sistemas complejos tienden a optimizar la degradación de energía, integrando ciclos, organizándose en forma de redes, redes dentro de redes reguladas a todas las escalas. Alfred Lotka anticipó hace más de medio siglo que la vida era en realidad un proceso disipativo metaestable, y ligó esa idea a escalas globales, tan amplias como nuestro sistema planetario. Así, argumentó que la composición química de la superficie de la Tierra se mantenía invariable, no porque fuera éste el estado más probable, sino porque existía un flujo y reciclaje continuo de partículas que mantenían la estabilidad global del sistema a partir del no-equilibrio. En breve seguiremos con Lotka y su visión energética de la Naturaleza.

Fig. 4 Huracán

Como decíamos, nuestro planeta y su biosfera se hallan en una región muy próxima al equilibrio termodinámico, pero lo suficientemente alejada de él como para generar y albergar estructuras complejas que se alimentan de gradientes, organizadas en sistemas disipativos metaestables. Como también veremos más adelante, el principal gradiente que sustenta la Tierra es el solar, reducido por la lluvia, el

viento, el mar, y como no, la vida en su conjunto. Las corrientes marinas conducen el calor a lo largo del planeta, haciéndolo circular a través de los océanos y manteniendo temperaturas suaves y constantes, como el sistema circulatorio distribuye energía a través del cuerpo. Los huracanes (fig. 4), que surgen de la diferencia vertical de temperatura entre la fría atmósfera y el océano más cálido, generan un gradiente horizontal de presión en un sistema altamente organizado, encaminado a degradar el gradiente del que nacen. La reducción del gradiente térmico de los polos al ecuador permite una homeostasis a nivel global, y esa cuidada coordinación de los elementos constituye la base de la regulación gaiana o fisiología planetaria, la metaestabilidad del sistema complejo que habitamos, nuestra Tierra. Según el biólogo teórico Robert Rosen, las estructuras complejas análogas a las biológicas pueden encontrarse en todo el universo, por lo que la organización de la materia en sistemas disipativos, en ocasiones altamente complejos, no parece un proceso tan raro, al menos desde un punto de vista termodinámico.

Pero, ¿qué ocurre con la vida? ¿cuál es su papel en este universo de sistemas complejos sedientos de gradientes?

La vida, creatividad disipativa

La mejor manera que se me ocurre en estos momentos para explicar mi visión de la *vida* es recurrir a la física fundamental, a la versión más universal de su significado. Muy por encima de nacer, crecer, reproducirse y morir, más allá del afán de competir y 'ganar', la vida puede ser abordada en un sentido mucho más amplio y presuntamente objetivo.

Los sistemas abiertos tienen la capacidad de crear y mantener formas organizadas de la materia, estructuras no aleatorias alimentadas por gradientes, alejadas del equilibrio y por tanto de la muerte termodinámica. La vida como entidad compleja creadora de formas y funciones metabólicas, resulta fácilmente explicable en términos 'bioenergéticos', y su evolución mucho más congruente con la visión gaiana de la Naturaleza.

Lotka, conocido por las famosas ecuaciones de Lotka y Volterra, también dedicó parte de sus investigaciones a realizar modelos de sistemas vivos, pasando a interpretar la vida como un proceso autocatalítico energizado en evolución (Lotka, 1922). Su visión energética de la Naturaleza ya apoyaba la hipótesis de Gaia mucho antes de su formulación. Los sistemas vivos evolucionan para captar y almacenar energía de maneras cada vez más eficientes, maximizando el flujo de energía que atraviesa sus fronteras. Según Lotka, la Selección Natural favorece aquellos organismos más capaces de metabolizar energía, creciendo y adquiriendo complejidad, extendiéndose como un todo y degradando cada vez mejor la luz solar que los alimenta.

La termodinámica nos dice, no obstante, que no existe selección posible en las formas emergentes, no hay variantes favorecidas en la generación de estructura. La biosfera no es repetible, de manera que su creciente complejidad no puede explicarse por Selección Natural sin caer en una evidente tautología. Todos los organismos viven inmersos en redes mayores, sistemas inteligentes integrados por multitud de módulos. El desarrollo de este tipo de sistemas conlleva una sucesión de etapas hasta llegar a su 'maduración' o clímax, de tal manera que a pesar de que nosotros, subjetivamente, percibamos una sustitución gradual a todos los niveles -asemejable a una selección- en realidad sólo se trata de una serie de pasos subyacentes a la organización ecológica de los seres vivos. Como analogía, durante el desarrollo ontogenético de numerosos animales se producen fenómenos de especialización acompañados de eliminación, sustitución o diferenciación celular pero en cualquier caso una sucesiva reestructuración de los elementos hasta llegar al individuo reproductor. Eso no significa, como es lógico, que las células eliminadas, sustituidas o diferenciadas en el transcurso de ese desarrollo sean menos capaces que las otras; muy al contrario, su importancia reside en que suponen pasos previos críticos en la culminación del proceso. Volviendo a lo que ocurre a nivel ecosistémico, la sustitución de unas especies por otras no supone una selección de variantes favorecidas, sino una compleja sucesión modular en la que intervienen multitud de sistemas vivos coordinados. Las especies pioneras crecen rápidamente, explorando y adecuando el medio para el asentamiento de otras posteriores, de crecimiento más lento, fundando así las primeras etapas que darán paso a las siguientes, que a su vez lo harán con otras, hasta alcanzar un grado de organización notablemente complejo. El sistema funciona o se colapsa: es, o no es.

Al margen de esto, la Naturaleza resulta ser un todo difícilmente analizable por partes, la vida y su entorno aparecen termodinámicamente conectados, y no son por tanto

explicables por separado. Los seres vivos, como sabemos, no están aislados de su medio abiótico, sino todo lo contrario; dependen de él y lo modifican, intercambiando materia y energía en un proceso incesante de disipación de gradientes.

¿Cómo discriminar entre lo vivo y lo no vivo, si la energía y la materia fluyen y se intercambian a través de nuestras 'fronteras', formando parte de nosotros por un tiempo, volviendo al exterior para más tarde entrar de nuevo? ¿Cuándo deja de ser inerte el oxígeno que inunda mis pulmones, el agua que circula por mis venas, o el dióxido de carbono que brota de mis labios al respirar? Los organismos están construidos de la misma materia que los rodea, partículas que circulan de lo vivo a lo inerte reciclándose en formas y procesos naturales perpetuados en el tiempo.

La vida es una propiedad emergente de la termodinámica del no-equilibrio, un insólito proceso disipativo, peculiar, original, pero al fin y al cabo natural. A todos sus niveles rezuma el orden, la imaginación, la complejidad y la belleza, pero también la función: los sistemas vivos beben de gradientes, los buscan para saciar su sed y disiparlos, manteniendo así su organización alejada del equilibrio, evitando su muerte termodinámica. El no-equilibrio puede generar sistemas cada vez más intrincados, integrados por más y más subsistemas, creando estructuras metaestables de redes en redes, células, tejidos, órganos, individuos, comunidades y ecosistemas, distintos niveles interconectados de complejidad creciente, inmersos en un sistema abierto mayor que los engloba. La vida en su conjunto se expande por la superficie de la Tierra, saboreando su química, intercambiándose con ella y alterándola.

El exceso de energía que fluye a través de los sistemas disipativos metaestables les permite crecer y evolucionar, pero ¿cuál es el equivalente termodinámico de la evolución? El "principio de máxima potencia" (Lotka, 1956), posteriormente adoptado por otros autores (entre ellos, Odum), establece que los organismos o ecosistemas más eficientes en la conversión de energía en biomasa se ven evolutivamente favorecidos. La evolución sería por tanto direccional, encaminada a optimizar la captación, almacenamiento y disipación de energía a lo largo del tiempo. Esta propuesta apoya la hipótesis de Gaia como sistema disipativo metaestable que involucra tanto la vida como el entorno en un perpetuo proceso de coevolución, sustentado por todo tipo de gradientes, energía de alta calidad que discurre en forma de estructura y se disipa de manera irreversible.

La irreversibilidad es otra propiedad fundamental de los sistemas termodinámicos alejados del equilibrio. El tiempo, que a nosotros se nos aparece lineal, fluye sin retorno, y la evolución que exhiben los sistemas complejos adaptativos, repleta de ineludibles restricciones y sesgos que determinan su progreso, está marcada por el reflejo inexorable de la historia. Los estados pasados no sólo importan, sino que además moldean los futuros, almacenándose en una especie de memoria interna, como un escrito imborrable, recuerdo de los estados iniciales del sistema.

Así, los sistemas complejos coevolucionan con su entorno, y fruto de su presente y su pasado surgen nuevos patrones, nuevas soluciones al problema termodinámico de destruir gradientes. La vida aparece por tanto como un proceso creativo de formas y funciones, irremediablemente sujeto a su historia.

Otra restricción de estos sistemas es la que subyace a la coordinada organización jerárquica que exhiben, redes dentro de redes, subsistemas con múltiples interacciones a todos los niveles. El orden reserva condiciones, límites en el desarrollo futuro.

Con todas las reglas del juego, la vida revolotea por la superficie de la Tierra, cada vez más perceptiva de su medio, más integrada y más compleja, pero siempre con la misma función tatuada en su memoria: reducir gradientes creando belleza.

La pregunta ahora es ¿coevolución global, o suma de evoluciones discretas?

Somos ciclos

Como estructuras que nacen de gradientes, los sistemas disipativos metaestables son frecuentes a todos los niveles de complejidad, y su comportamiento a lo largo del tiempo refleja su naturaleza minuciosamente coordinada. No evolucionan aislados del sistema mayor al que pertenecen, cambian con él, inevitablemente unidos y progresando como un todo indivisible. La hipótesis de Gaia otorga, con su visión global de la Naturaleza, nuevas claves para desenmarañar la historia de la vida en la Tierra, o más bien la historia de la vida *y* la Tierra. ‘Tan sólo’ es necesario demostrar que los sistemas biológicos se estructuran en niveles interconectados, desde lo microscópico hasta lo planetario, organizados en algo así como ciclos dentro ciclos, redes dentro de redes desarrollándose y creciendo a la vez, autoimpulsadas e indivisibles.

Los ciclos (véase fig. 5), consecuencia lógica de las dos primeras leyes de la termodinámica, son constantemente descritos por la materia en regiones de flujo de energía. Su omnipresencia a todos los niveles de lo complejo pone de manifiesto el papel que ocupan en la Naturaleza; en los sistemas abiertos, los ciclos parecen ser responsables del crecimiento, cambio y consecuentemente, evolución de nuevas estructuras.

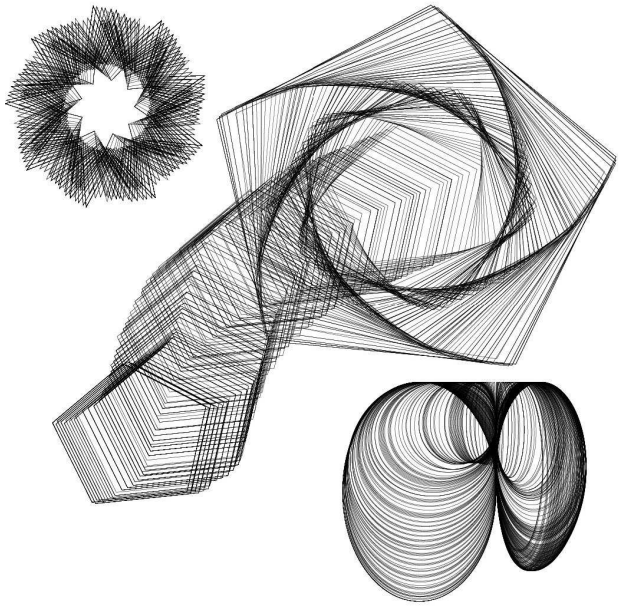

Fig. 5 Distintos tipos de ciclos

Robert Ulanowicz, formado en ingeniería química y catedrático de ecología teórica, ha dedicado gran parte de sus investigaciones a estudiar posibles maneras de medir el flujo de energía en los sistemas biológicos. Sus resultados muestran la existencia de procesos cíclicos en todos los niveles de la organización ecosistémica, muchos de ellos auto-reforzantes, bucles retroactivos positivos. Así, Ulanowicz sostiene que los organismos y las poblaciones actúan como catalizadores de las reacciones naturales, y propone el caso de la planta carnívora *Utricularia*, que se desarrolla en aguas dulces someras. En sus ramas y sus hojas se asientan diversas comunidades de algas diatomeas, fitoplacton que alimenta a pequeños crustáceos que nadan alrededor. Estos organismos microscópicos son a su vez presa de otro mayor, en este caso *Utricularia* captura el zooplancton mediante sus trampas foliares, cerrando así el ciclo autocatalítico. Un incremento en la abundancia de cualquiera de estas tres poblaciones conllevaría un aumento del resto (Ulanowicz, 1995), de manera que esta red auto-reforzante podría crecer cada vez más si dispusiera de los recursos requeridos. Evidentemente esto no ocurre, las redes autocatalíticas no crecen indefinidamente, existen procesos, tanto fisico-químicos como biológicos, que moderan su desarrollo. Según este autor, la selección actúa favoreciendo aquellos miembros de la red que mejor se integren en el ciclo autocatalítico. Considerado individualmente, un ciclo no se limita a reaccionar respecto a tu entorno, sino que crea activamente su propio dominio de influencia (Ulanowicz, 1997).

Si los sistemas biológicos funcionan como redes autocatalíticas, resulta lógico pensar que cualquier cambio que altere una de sus partes acarree una cascada de efectos en el resto, sin necesidad alguna de selección. Los ecosistemas se mantienen estables durante largos periodos de tiempo, estructurados en tupidas redes auto-organizadas y auto-reguladas que comparten una configuración global común. Existe una evidente jerarquía ecológica, basada en las diversas soluciones metabólicas que ha inventado la vida a lo largo de su evolución, pero los elementos que conforman los distintos niveles coordinados no son seleccionados, sino generados por la propia organización intrínseca del sistema complejo.

A pesar de que según algunos autores los sistemas vivos se organizan en procesos causales circulares cerrados, exhibiendo la aparente peculiaridad de poder 'crearse a sí mismos' por medio de una propiedad emergente denominada *autopoiesis* (Maturana y Varela, 1972), esa concepción puede generar confusión: en realidad los organismos no son sistemas cíclicos estancos, sino que como sabemos, se encuentran irremediablemente unidos al entorno. No pueden perpetuarse de manera aislada, independientemente de su ambiente bio- y abiótico, lo que de nuevo nos enfrenta al problema de individualizar a la biosfera en entidades discretas.
Independientemente de esto y volviendo al tema que no ocupa, en la Naturaleza los sistemas disipativos metaestables no cambian sustancialmente, al menos en lo que respecta a sus formas y funciones generales pero entonces, ¿qué ocurre con los eventos macroevolutivos? ¿cómo surgen nuevas innovaciones?

A pesar de que los ciclos autocatalíticos biológicos son procesos disipativos metaestables, reacios al cambio y por tanto adaptativos, existen umbrales a partir de los cuales el sistema es incapaz de amortiguar alteraciones modificando su ambiente y se transforma. Ilya Prigogine, galardonado con el Premio Nobel de Química en 1977, sostiene que en un sistema complejo, determinadas perturbaciones pueden causar el paso de un estado estable a otro, pasando por transiciones súbitas o bifurcaciones. Es lo que se conoce como teoría de bifurcaciones (Prigogine, 1981). Este proceso puede ejemplificarse por medio de una bola rodando hasta el fondo de un valle (o punto de estabilidad). Ante un evento singular, la bola que rueda pendiente abajo puede "optar" por caer en uno u otro valle, lo que conduce a nuevos estados estables, nuevas configuraciones, y por tanto nuevos sistemas. Así, las estructuras disipativas son

sistemas dinámicos alejados del equilibrio, con gradientes internos, y capaces de adquirir complejidad exportando entropía al medio (Prigogine, 1955).

El doctor en física teórica Fritjof Capra asimila las catástrofes ambientales a ‘puntos de bifurcación’ planetarios, tras los cuales se producen grandiosas innovaciones evolutivas. El uso del agua en la fotosíntesis, fruto de la drástica reducción de hidrógeno en la atmósfera terrestre hace dos mil millones de años, provocó la posterior crisis de polución por oxígeno que a su vez desencadenó la aparición de la ‘moderna’ respiración oxigénica. También las bruscas ‘radiaciones’ macroevolutivas siguieron a grandes extinciones en masa, consecuencia de eventos ambientales estocásticos (Capra, 1996).

Por su parte, el biólogo teórico Stuart Kauffman recuerda que la biosfera exhibe un comportamiento de complejidad creciente, adoptando nuevas configuraciones químicas, expandiéndose y evolucionando sin cesar. Según él, debería promulgarse una 4ª ley de la termodinámica que explicase esa característica exploratoria de la vida, ese espacio de posibilidades que intenta ocupar, lo que él mismo llama “lo adyacente posible”. Se trata de las diversas combinaciones químicas y funcionales que pueden darse en la Naturaleza. Su búsqueda de pautas matemáticas para describir la complejidad evolutiva le llevó a acuñar la expresión “orden gratuito”, no sujeto a selección natural (Kauffman, 1993) y dicha constatación, de evidente relevancia, ha sido demostrada en múltiples procesos biológicos a todas las escalas. Así, la explicación algebraica de Kauffman sobre la forma en que los genes reguladores pueden restringir un vastísimo número de posibilidades a unas pocas combinaciones dentro de un conjunto manejable, se refleja en el número real de genes reguladores humanos y el número relacionado de tipos celulares diferenciados. No obstante, el crecimiento en complejidad que conlleva el incremento en el número de estirpes celulares puede ser igualmente fruto del comportamiento de sistemas disipativos que adoptan nuevas vías energéticas a medida que la reducción de gradientes conduce a rutas alternativas estables.

De cualquier manera, a pesar de la ineludible pauta que dicta la termodinámica, esa intrínseca tendencia que permite incrementos brutales de complejidad en los seres vivos, otros sistemas son responsables directos de los cambios macroevolutivos a los que se ven sometidos. Embebidos unos en otros, los organismos se tornan en verdaderos procesos integrados y coordinados que reciclan información del ambiente en el que se

desarrollan. A lo largo de su evolución los seres vivos se unen y combinan por procesos tales como la endosimbiosis, y aumentan por tanto en complejidad de forma brusca, adquiriendo nuevas morfologías y capacidades emergentes. En la actualidad el manifiesto papel de los virus en esas explosiones de creatividad empieza a ser objeto de gran interés en los estudios sobre evolución de genomas, aunque hace tiempo ya que algunos científicos, como el profesor Maximo Sandín, ponen en cuestión la mutación aleatoria, la selección natural y por tanto la evolución gradual de los seres vivos.
Me encantaría detenerme sobre este tema pero no me es posible, he de hablar ahora de la fuente primera de energía que nos nutre, a nosotros Gaia.

Nuestro gradiente

La vida en la Tierra se mantiene debido a que el aporte de energía continúa en el tiempo, es decir a que nuestro planeta es un sistema abierto que bebe luz del exterior y depende por tanto de esa radiación solar, de ese gradiente, para mantenerse habitable. Sin la luz del sol la inmensa mayoría de seres vivos desaparecerían de la superficie terrestre. Tan sólo aquellos organismos que viven en la oscuridad y no dependen del gradiente solar, sobrevivirían -un tiempo- sin el sol. Allí donde la luz no llega y la materia orgánica en descomposición ya ha sido reciclada a menores profundidades, existen oasis de vida temporalmente ‘independiente’ de la radiación solar. En las chimeneas hidrotermales de las profundidades marinas no existe vegetación que realice la fotosíntesis, de manera que las comunidades de seres vivos abisales dependen de la energía volcánica. La producción primaria es proporcionada por bacterias quimiosintéticas que sustentan toda la red ecológica asociada a dichas chimeneas. En realidad, el microcosmos es capaz de fermentar, fotosintetizar y respirar multitud de compuestos, y representa así la fracción base de los subsistemas gaianos; en este caso las bacterias que oxidan H_2S pueden encontrarse libremente en el fluido que escupen las fumarolas, o bien hallarse embebidas en tejidos animales, como las bacterias endosimbiontes del trofosoma de *Riftia*, pero en cualquier caso reducen el gradiente al cual se ven sometidas.
A pesar de la omnipotencia bacteriana, la inmensa mayoría de organismos necesita directa o indirectamente de la luz solar para su desarrollo y supervivencia, reduciendo ese gradiente a medida que intercambian materia y energía. Así, la materia producida

por los autótrofos durante la fotosíntesis es utilizada por los productores secundarios, los heterótrofos herbívoros, mientras parte de la energía generada es transferida y el resto disipado en forma de calor. A continuación, la materia creada por los herbívoros es aprovechada por los carnívoros, los cuales mueren y alimentan a los descomponedores que retornan los nutrientes al suelo, y todo comienza de nuevo. Tal y como comentábamos, los sistemas biológicos se organizan formando ciclos a todas sus escalas, mientras destruyen gradientes y generan otros nuevos en un continuo reciclaje de materia.

III. Conclusión: redes en redes

"*Hay que hacer las cosas tan simples como sea posible, pero no más*".

Albert Einsten

El reduccionismo consiste en disgregar, dividir, descomponer un sistema para analizar sus partes constituyentes por separado, y resulta enormemente útil en determinadas etapas de una investigación. Un análisis de los elementos que componen un sistema concreto del cual conocemos previamente su naturaleza y función globales, otorga mayor precisión al estudio. Es una cuestión de orientación: tal y como propongo en este trabajo, es necesario conocer el *todo* para poder comprender la función precisa de sus *partes* constituyentes. El problema de la visión atomizada de la ciencia es que el enfoque se orienta al revés. Los sistemas complejos no pueden ser entendidos ni explicados como simples agregados de unidades discretas junto a sus propiedades individuales, ya que existen propiedades emergentes de nivel superior que no pueden reducirse a otras de menor rango.

Por otra parte, he querido hacer énfasis en el papel activo de los seres vivos en la evolución de Gaia, o al menos en su evolución y la de su ambiente. A medida que se desarrollan, los organismos absorben información, la asimilan, y responden a ella de forma sutil y elaborada. La inteligencia no es una habilidad exclusiva de unos pocos afortunados, el hombre y sus parientes más cercanos, sino una característica inherente a todos los sistemas naturales. Con frecuencia consideramos que los seres vivos no humanos se comportan de forma automática e involuntaria, desdeñamos su ingenio natural para afrontar retos y lo que es más sorprendente: dedicamos inútiles esfuerzos en buscar vida inteligente fuera de la Tierra para saciar nuestra curiosidad. Sin embargo, la inteligencia puede percibirse mucho más cerca de nosotros, a nuestro alrededor, en nuestro propio planeta. A pesar de que la manera reduccionista, y una vez más, limitada visión actual de la Naturaleza nos lleva a juzgarla e interpretarla en términos mecanicistas, son numerosos los estudios que demuestran la flexibilidad creativa y original del comportamiento de los sistemas naturales.

Me gustaría terminar este trabajo introduciendo mi proyecto de tesis doctoral, sobre redes tróficas en hayedos. La ecología evolutiva trata de explicar la dinámica evolutiva de los ecosistemas, es decir el desarrollo de las complejas redes de interacción que las especies establecen al relacionarse de muy diversas formas entre sí. Así, la configuración de las redes ecológicas condiciona las funciones de los ecosistemas que éstas representan, y el reciclado de nutrientes, los flujos de agua y de carbono, entre otras muchas funciones, pueden verse alteradas si se pierde tal estructura (Schuelze & Mooney, 1994; Levin, 1999).

Si la arquitectura de la red resulta tan determinante en el funcionamiento del ecosistema que constituye, y por tanto en su papel dentro del 'megasistema' gaiano, ¿cómo se desarrollan este tipo de estructuras? ¿son aleatorias? ¿existe una arquitectura universal? La línea de investigación de Montoya y sus colaboradores va dirigida a conocer cuáles son esas configuraciones ecológicas, cómo funcionan y evolucionan. En el caso de las redes tróficas, la complejidad subyacente a su entramado hace de ellas un estimulante sujeto de estudio. Una red trófica exhibe todas las vías posibles de alimentación de cada una de las especies que la constituyen, pudiendo llegar a ser extremadamente compleja (fig. 6, Montoya et al., 2001).

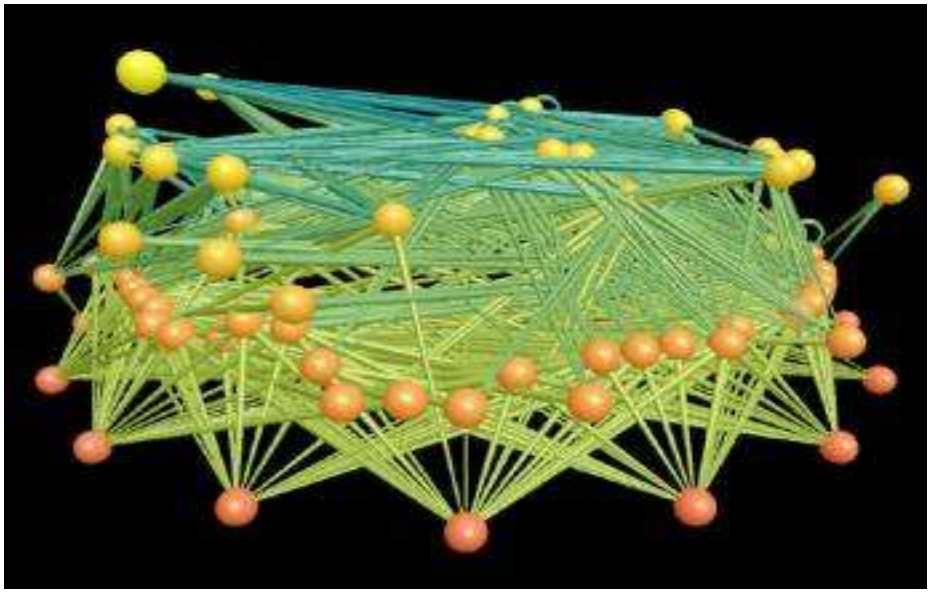

Fig. 6 Red trófica del lago Little Rock (Wisconsin, EE.UU). Representación tridimensional cortesía de Richie Williams y Neo Martínez, EEUU. (Montoya et al., 2001).

Creo que el estudio de las redes ecológicas, tanto tróficas como mutualistas, resulta de enorme importancia en la búsqueda de respuestas evolutivas. Así como su análisis a través de grafos ayuda a estimar sus dimensiones y su complejidad, la obtención de datos experimentales puede solventar muchas de las cuestiones acerca de su funcionamiento y dinámica temporal. Espero que mi trabajo en los hayedos ayude a esclarecer algunos de estos asuntos.

Bibliografía

Bénard, H. (1900) 'Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide', *Revue Générale des Sciences Pures et Appliquées* 11, 1309-1328.

Kauffman, S. (1993) *Origins of order: Self-organization and selection in evolution*, Oxford University Press, Nueva York.

Lenton, T. M. (2002) 'Testing Gaia: The Effect of Life on Earth's Habitability and Regulation', *Clim. Change* 52, 409–422.

Levin, S. (1999) *Fragile Dominion*. Perseus Books, Reading (Massachussets).

Lotka, A. J. (1922) 'Contribution to the Energetics of Evolution', *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 8, 147–151.

Lotka, A. J. (1956) *Elements of mathematical biology*, Dover, Nueva York.

Lovelock, J., Bateson, G., Margulis, L., Atlan, H., Varela, F. Maturana, H., etc. (1987) *Gaia, a way of knowing*. The Lindisfarne Association, Inc.

Michel, P., Farinella, P., and Froeschlé, C.: 1996, 'The Orbital Evolution of the Asteroid Eros and Implications for Collision with the Earth', *Nature* 380, 689–691.

Montoya J.M., R.V. Solé, Rodriguez M.A. (2001) La arquitectura de la naturaleza: complejidad y fragilidad en redes ecológicas. *Ecosistemas* 10 (2).

Prigogine, I. (1955) *Thermodynamics of irreversible processes*, John Wiley and sons, Nueva York.

Prigogine, I. (1981) *From being to becoming: Time and complexity in the physical sciences*, W. H. Freeman & Co., Nueva York.

Schulze, E-D and Mooney, H.A. (1994) Ecosystem function of biodiversity: a summary. En *Biodiversity and ecosystem function* (eds. Shultze, E.D. y Mooney, H.A.), pp. 497-510, Springer-Verlag, Berlin.

Schwartzman, D. W. and Volk, T. (1989) 'Biotic Enhancement of Weathering and the Habitability of Earth', *Nature* 340, 457–460.

Ulanowicz, R. E. (1995) 'Occam's razor is a double-edged blade', Zygon 30, 249-266.

Ulanowicz, R. E. (1997) *Ecology: The ascendent perspective*, Columbia University Press, Nueva York.