

## Opinión

# James Lovelock: la visión de un científico excepcional

## James Lovelock: the vision of an exceptional scientist

 Peter Paul Bunyard, FLS

PL30 5NW, Bodmin, Cornwall, United Kingdom.

### Resumen

En los años 60, la NASA pidió a James Lovelock, inventor del detector de captura de electrones, que desarrollara instrumentos para detectar vida en Marte. Al considerar cómo se manifestaría la vida, se dio cuenta de que la atmósfera de la Tierra estaba a órdenes de magnitud del equilibrio químico y que ese desequilibrio no podía deberse puramente a procesos abiológicos, sino que era mantenido en un estado dinámicamente estable por efecto de la vida en el planeta. En aquella época, el análisis espectrométrico de la atmósfera de Marte indicaba que estaba cerca del equilibrio químico y Lovelock concluyó que era poco probable que Marte albergara vida. Dado que la Tierra había tenido organismos biológicos durante al menos 3,2 mil millones de años, Lovelock llegó a la conclusión de que la vida era responsable de la homeostasis planetaria en el sentido de mantener las condiciones óptimas de la superficie, de ahí su Hipótesis Gaia.

**Palabras clave:** Gaia; Espectrometría; Bomba biótica; Endosimbiosis; Cambio climático.

### Abstract

In the 1960s, James Lovelock, the inventor of the Electron Capture Detector, was asked by NASA to develop instrumentation to detect life on Mars. In considering how life would manifest itself, he realized that the Earth's atmosphere was orders of magnitude away from chemical equilibrium and that such disequilibrium could not be due purely to abiological processes but was maintained in a dynamically stable state by Life. At that time, spectrometric analysis of the atmosphere of Mars indicated that it was close to chemical equilibrium and Lovelock concluded that Mars was unlikely to harbour life. Since the Earth had had biological organisms within for at least 3.2 thousand million years, Lovelock concluded that life was responsible for planetary homeostasis in the sense of maintaining optimum surface conditions, hence his Gaia Hypothesis.

**Keywords:** Gaia; Spectrometry; Biotic pump; Endosymbiosis; Climate change

James Lovelock falleció el 26 de julio de 2022, después de cumplir 103 años (**Figura 1**). Durante su larga y agitada vida, cambió la forma de pensar sobre la Tierra y nuestro lugar en este fascinante y único planeta. Para aquellos que están dispuestos a escuchar, nos hizo comprender que la vida en su totalidad es responsable de hacer el planeta habitable y de mantenerlo habitable. Ahora sabemos, gracias a los estudios científicos, que la vida, de una u otra forma, ha estado en este planeta durante al menos 3.500 millones de años, no sólo sobreviviendo a eventos de extinción como el asteroide Chicxulub que, hace 65 millones de años, acabó con la gran mayoría de los dinosaurios, sino transformando cada rincón de la superficie en un entorno que soporta fácilmente la vida, aunque sea solo bacteriana.

Hace más de 50 años, Lovelock llegó a la conclusión de que, si la Tierra nunca hubiera tenido vida, habría tenido el mismo destino que Venus. Nuestra atmósfera, en lugar de ser respirable, con mucho oxígeno, habría tenido más de un 95% de dióxido de carbono, lo que le conferiría una presión equivalente a 60 veces la actual. El efecto invernadero de todo ese dióxido de carbono habría dado a la Tierra una temperatura superficial media de 240°C, lo suficiente como para evaporar cualquier asomo de vida en nuestro planeta.



**Figura 1.** James Lovelock (1919-2022). <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3873472>

A mediados de los años 60, Lovelock trabajaba para la NASA en California. Para entonces, había inventado un dispositivo, un detector de captura de electrones (ECD), como él lo llamaba, que era tan sensible que podía captar rastros contaminantes en el aire como los de los clorofluorocarbonos (CFC), incluso si su concentración era tan pequeña como una parte en un trillón. En de hecho, era justo el tipo de dispositivo que la NASA estaba buscando en sus preparativos para enviar una nave de aterrizaje no tripulada a Marte, el *Viking Lander*. No es de extrañar, pues, que la Agencia pidiera a Lovelock que se uniera a un equipo que buscaba formas de detectar si el planeta tenía alguna evidencia de vida.

La preocupación inicial de Lovelock era que el Lander podría aterrizar en una región de Marte paralela a un desierto tan seco como el Sahara y, como este, con no más que una fina dispersión de alguna forma de vida que podría pasar fácilmente desapercibida. Por lo tanto, aunque la vida pudiera estar presente, a menos que se capturara algún espécimen, nadie se daría cuenta. Esto le llevó a pensar, años antes de que el *Lander* aterrizara en julio de 1976, en cómo se manifestaría la vida en un planeta, y se le ocurrió que la atmósfera de la Tierra, con su alta concentración de nitrógeno, 78%, de oxígeno, 21%, de dióxido de carbono, 0,03% (en los años sesenta), y con apenas una pizca de metano, 0,003%, no era en realidad otra cosa que la huella de la vida en nuestro planeta.

De hecho, a menos que se incluyera la vida con su metabolismo, era difícil explicar cómo podía ser posible que el metano y el oxígeno estuvieran presentes simultáneamente en la atmósfera de la Tierra, ya que los dos gases, uno reductor y el otro oxidante, interactuarían sin barreras hasta el punto de que todo el metano se habría oxidado. Y, en la Tierra, lo que emite el metano no es otra entidad que la propia vida en forma de bacterias metanógenas: es ese tipo de emisión el que mantiene el fenómeno de los dos gases presentes simultáneamente en la atmósfera terrestre.

En 1967, nueve años antes de que despegara el proyecto *Lander*, James Lovelock y Dian Hitchcock dieron una respuesta sucinta a la cuestión de encontrar vida en Marte:

Los sistemas vivos llevarán sus entornos a un desequilibrio físico o químico, reconocible como tal si los datos existentes son suficientes para descartar las explicaciones de su estado en términos de procesos abiológico; y, en segundo lugar, que siempre existirá

un gradiente de entropía entre los sistemas vivos y sus entornos no vivos. Además, cualquier biota planetaria que interactúe con su atmósfera llevará a ésta a un estado de desequilibrio que, de ser reconocido, constituiría también una evidencia directa de vida, siempre que la extensión del desequilibrio sea significativamente mayor de lo que permitirían los procesos abiológicos. Se demuestra que la existencia de vida en la Tierra puede inferirse a partir del conocimiento de los componentes principales y trazas de la atmósfera, incluso en ausencia de cualquier conocimiento de la naturaleza o extensión de las formas de vida dominantes. (**Hitchcock & Lovelock, 1967**).

De hecho, aquí estaban las semillas de la Hipótesis Gaia de Lovelock (Lovelock **Lovelock** [1979] 2000; **Bunyard & Goldsmith, 1988**; **Watson, 1996**; **Lovelock, 2007**). Una colaboración posterior con la bióloga Lynn Margulis, apuntaló la idea de Gaia, llamada así por la diosa griega clásica de la Tierra, y ya incorporada a la nomenclatura de la Geología, la Geo-grafía y, más recientemente, las Geo-ciencias.

A mediados de la década de 1970, el análisis espectrométrico de las atmósferas de nuestros dos planetas vecinos, Venus y Marte, demostró que sus atmósferas estaban compuestas principalmente por dióxido de carbono y que todos los gases presentes se encontraban en un estado de equilibrio químico invariable. ¿Descartó este importante hallazgo la vida en Marte? Para Lovelock sí, ciertamente, y junto con Margulis promulgó su hipótesis sobre el caso especial de la Tierra, en su comentario de 1974 en la revista *Tellus*:

En la Tierra, la presencia simultánea de  $O_2$  y  $CH_4$ , en las concentraciones actuales, es una violación de las reglas de la química del equilibrio de no menos de 30 órdenes de magnitud. En efecto, el desequilibrio entre los gases de la atmósfera terrestre es tan grande que tiende a una mezcla combustible, mientras que los gases de Marte y Venus se acercan al equilibrio químico y son más bien productos de combustión.

Y concluyeron:

“A los que están convencidos de que los gases atmosféricos son productos biológicos, pero se resisten a aceptar la noción de homeostasis, les decimos: si la vida tiene un papel meramente pasivo en el ciclo de los gases del aire, entonces las concentraciones serán fijadas por la química del equilibrio; de hecho, ciertamente no lo están. Si la vida realiza un ciclo activo de los gases, entonces nos preguntamos ¿cómo podría un sistema así ser estable a largo plazo sin homeostasis? (**Lovelock & Margulis, 1974**).

La atmósfera de la Tierra está llena de misterios, sobre todo en lo que se refiere a por qué tanto nitrógeno, cuando no se encuentra este elemento en las atmósferas de nuestros dos planetas vecinos. Al principio de su concepción teórica de Gaia, Lovelock se preguntó cómo era posible que el oxígeno estuviera presente junto con el nitrógeno en concentraciones tan elevadas. En su artículo de 1969, Lovelock y Giffen señalan que:

El nitrógeno reacciona bajo la influencia de los rayos UV solares, las descargas eléctricas, la radiación de ionización y la combustión tanto con el  $O_2$ , como con el  $CO_2$ , para dar lugar a óxidos de nitrógeno. Mediante estos procesos, con el tiempo todo el nitrógeno se convertiría en el estable  $NO_3^-$ , ion disuelto en los océanos. Incluso en Marte, las reacciones inversas que convierten el  $NO_3^-$ , en  $N_2$  no proceden. En el curso de la eliminación de  $N_2$ , la mayor parte del  $O_2$ , también saldría de la atmósfera. La continuación de la fotólisis del agua y del  $CO_2$  aseguraría la producción de algo de oxígeno, de modo que la eliminación del nitrógeno podría completarse. Al final, la atmósfera, aparte del argón, estaría dominada por el  $CO_2$ , como las de Marte y Venus. (**Lovelock & Giffen, 1969**).

Y finalmente:

Los flujos simultáneos y grandes de  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $N_2O$  y  $O_2$ , son todos inconsistentes con un modelo abiológico. El grado de desviación de las expectativas de equilibrio debe medirse en decenas de órdenes de magnitud. El hecho de que aún

no se haya detectado nitrógeno en Marte está de acuerdo con la expectativa de la química de equilibrio. Una Tierra sin vida tampoco tendría nitrógeno atmosférico (Lovelock, 1972).

Lovelock, en efecto, nos abrió los ojos a lo extraordinario de la Tierra. Pero la gran pregunta sigue siendo: ¿Es sólo una casualidad que la Tierra haya proporcionado un entorno que satisface las necesidades básicas de la panoplia de la vida? O bien la Vida lo ha hecho así y, si la humanidad ha heredado el mejor de los mundos posibles, ¿se lo debemos a miles de millones de años de vida anteriores a nuestra propia llegada al escenario planetario? En otras palabras, la regulación de los procesos de la superficie, desde la corteza terrestre hasta el borde exterior de nuestra atmósfera, ¿es el resultado del metabolismo y la fisiología de toda la vida, por lo tanto, *gaiana*, o es sólo una casualidad que las condiciones de la Tierra se adapten a nosotros en este momento? Y si todo va mal, como parece ser el caso ahora con el calentamiento global y los impactos de un clima que cambia rápidamente, ¿se recuperarán las condiciones adecuadas por casualidad o necesitarán la interferencia específica de la vida?

Los críticos de Lovelock, como el biólogo y autor de *El gen egoísta*, Richard Dawkins, rechazaron la idea de que la vida gestione las condiciones de la superficie de la Tierra, aunque tuvieron que aceptar que las actividades de la vida provocan cambios en la química de la Tierra, como la emisión de oxígeno por la fotosíntesis o la producción de nitrógeno por la acción de las bacterias desnitrificantes. Pero que esas concentraciones de gases se regularían hasta el punto de estar en un estado de equilibrio dinámico: ¿cómo podría la vida saber lo que era bueno para ella? Dawkins consideraba que la vida estaba inmersa en una lucha neodarwiniana por la existencia, en la que el puro azar intervenía para determinar si los genes de un organismo eran más adecuados que los de otro a la hora de enfrentarse a un entorno externo que le era ajeno.

Plenamente consciente de que la fisiología de los sistemas vivos está estrechamente regulada por las retroalimentaciones, Lovelock no veía ninguna razón por la que dichas retroalimentaciones no fueran el medio a través del cual la vida gestionaba su entorno exterior en su propio beneficio. Tales retroalimentaciones se aplicarían a la química de la atmósfera, a las sales del mar e incluso a cierta regulación de los procesos climáticos, incluidos los derivados de los gases de efecto invernadero, como el CO<sub>2</sub> y el metano (CH<sub>4</sub>). El ciclo hidrológico también figuraría en ese proceso de regulación mediante la transpiración de la vegetación y por la capacidad de formación de nubes del fitoplancton marino, como los cocolitóforos.

En 1971, Lovelock se encontraba en el Atlántico Sur a bordo del buque de investigación RRS Shackleton, con su ECD y un cromatógrafo de gases de fabricación casera. Uno de los gases que recogió fue el sulfuro de dimetilo (DMS), una sustancia volátil que emiten las algas unicelulares cocolitóforas cuando mueren. Además de poseer clorofila y realizar la fotosíntesis, los cocolitóforos tienen caparazones duros de calcita que, al morir el organismo, tienden a acumularse en el lecho oceánico cerca del margen continental de una placa tectónica, contribuyendo así tanto al depósito de CO<sub>2</sub> en forma de roca dura como, durante un período de muchos millones de años, a las cordilleras calcáreas que flanquean cordilleras ígneas como el Himalaya y los Andes.

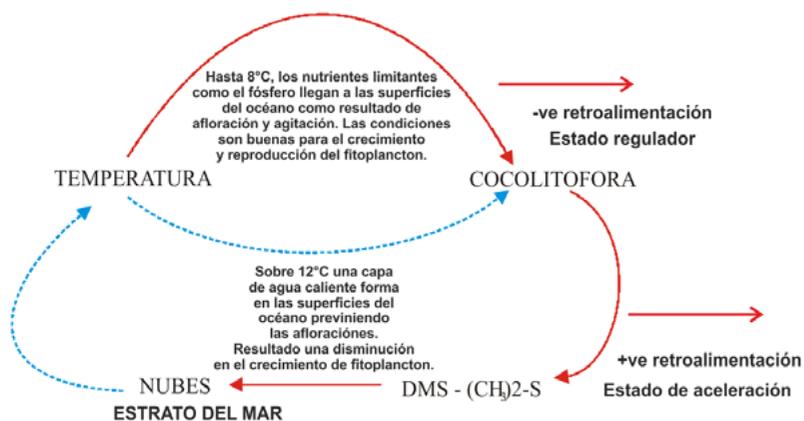
Al ser emitido, el DMS se oxida rápidamente a dióxido de azufre, ácido sulfúrico o ácido metano sulfónico, y cada una de estas sustancias puede estimular la formación de nubes. Las nubes marinas, una vez formadas, reflejan la luz solar hacia el espacio y actúan así para enfriar el océano. Como la mayoría de los organismos eucariotas, los cocolitóforos crecen mejor cuando la temperatura circundante es cercana a los 22 °C, pero ese crecimiento depende de la disponibilidad de nutrientes. Los afloramientos de nutrientes se asocian con aguas más frías y una vez que la temperatura de la superficie de los océanos supera los 12 °C, se forma una gruesa capa de agua caliente e impide que el afloramiento de nutrientes llegue a la superficie y alimente así a los cocolitóforos.

Lovelock previó entonces cómo las algas podían participar en la regulación de las temperaturas superficiales en las regiones del océano donde la temperatura no superaba los 12 °C. Con esto en mente, Lovelock unió con científicos oceanográficos, Robert Charlson, Meinrat Andreae y Stephen Warren, y juntos desarrollaron lo que se conoció como la “Hipótesis CLAW”, utilizando las iniciales del apellido de sus proponentes (**Charlson et al.**, 1987). En esencia, un florecimiento blanco lechoso de cocolitóforos puede cubrir muchos kilómetros cuadrados, como se puede ver al lado de la costa de Cornwall en Inglaterra. Las nubes se forman sobre el florecimiento, lo cual causa que las temperaturas bajen de tal manera que el crecimiento de los cocolitóforos se disminuya y con ello las emisiones de DMS. Ahora por la falta de DMS, la formación de nubes esta reducida y la luz solar puede volver a calentar las aguas superficiales. Mientras los nutrientes estén disponibles, el crecimiento puede volver. Por lo tanto, tenemos un ciclo de retroalimentación negativa por lo cual la temperatura de la superficie se mantiene dentro de límites viables.

Sin embargo, a medida que las aguas superficiales se calientan debido a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, cuando una capa de agua cálida impide que los nutrientes lleguen a la superficie, el umbral de 12 °C se sobrepasará cada vez más en las partes del océano donde normalmente florecen algas planctónicas como los cocolitóforos. Con una reducción significativa del tamaño de las floraciones, se formarán menos nubes y las aguas superficiales seguirán siendo cálidas. La retroalimentación es ahora positiva y hasta cierto punto la vida habrá perdido su capacidad de regular las temperaturas de la superficie, tal y como se presenta en las retroalimentaciones de la **figura 2 (Charlson et al., 1987)**.

Durante su estudio de las trazas de gases mientras estaba en el RSS Shackleton, Lovelock descubrió rastros de los CFC que se habían impregnado allí desde el Norte industrial, donde se utilizaban cada vez más como refrigerantes y propulsores de aerosoles. Dos científicos, Mario Molina y Sherwood Roland, se encontraron con los hallazgos de Lovelock y, en 1974, expresaron su preocupación de que los CFC, al filtrarse a la estratosfera, podrían estar contribuyendo a la destrucción fotolítica del ozono, de manera que los dañinos rayos UV-B llegarían a la superficie de la Tierra y causarían cáncer de piel y la muerte. Diez años más tarde, las Naciones Unidas, bajo lo que se denominó el Protocolo de Montreal, introdujo la prohibición del uso de los CFC. En 1995, Rowland, Molina y el químico atmosférico Paul Crutzen recibieron el Premio Nobel de Química. La crucial contribución de Lovelock fue ignorada (**Molina & Rowland, 1974**).

### NUBES, FITOPLANCTON Y TEMPERATURA



Razón de Redfield: P:N:C:-O<sub>2</sub> = 1:16:117:170

**Figura 2.** Retroalimentación de nubes y fitoplancton en función de la temperatura

Una Tierra sin vida tendría un pH poco ácido, aunque el pH real es casi neutro. Lovelock y Giffen, en su artículo de 1969, no se andan con rodeos al afirmar que las condiciones de la superficie de la Tierra se gestionan por medio de la suma del metabolismo de todos los organismos vivos juntos y en particular los de origen bacteriano.

Al igual que con el CH<sub>4</sub>, la biosfera utiliza una gran cantidad de energía para la producción de NH<sub>3</sub>. Cuando se tiene en cuenta la producción total de ácidos por la oxidación del nitrógeno y del azufre, la producción de amoníaco de la biosfera es suficiente para mantener un pH pluvial cercano a 8, el óptimo para la vida. Una de las penalidades de los ambientes oxidantes es la tendencia a un pH bajo ya que los elementos como el carbono, el nitrógeno y el azufre se oxidan. La enorme producción biológica de amoníaco responde convenientemente a esta necesidad. ¿Puede ser accidental y haber sido siempre así? Otros gases y vapores atmosféricos, por ejemplo, el sulfuro de dimetilo, el seleniuro de dimetilo y el yoduro de metilo, pueden servir en la transferencia de masa de elementos esenciales entre la tierra y el mar. En resumen, hay pruebas abrumadoras de que la atmósfera, aparte de su contenido de gases nobles, es un producto biológico. También puede ser un artilugio biológico, no vivo, pero tan esencial como una parte de la biosfera como la concha de un caracol o la piel de un visón. (Lovelock & Giffen, 1969).

Los bosques, especialmente los que cubren millones de kilómetros cuadrados como los del Amazonas, el Congo y la Rusia boreal, son actores de importancia crítica para llevar la lluvia al interior profundo de los continentes y, mediante el bombeo de agua a través de los estomas de sus hojas, en la formación de densas nubes que, como las nubes marinas procedentes de las emisiones de DMS, tienden a enfriar la superficie planetaria. Lovelock ciertamente se dio cuenta desde un punto de vista gaiano de que la humanidad se estaba disparando en el pie al perpetrar la destrucción y la degradación de los grandes bosques del mundo y que estábamos perdiendo la forma que tiene la naturaleza de controlar la temperatura de la superficie. En efecto, el papel hidrológico de los bosques es tan importante en lo que respecta a la temperatura de la superficie como lo es su función de captación y almacenamiento de carbono.

Qué terrible entonces que la destrucción del Amazonas continúe, sobre todo en el Brasil de Bolsonaro. La ignorancia deliberada de quienes permiten la destrucción de los bosques es, en realidad, un crimen contra toda la humanidad. En línea con el pensamiento de Lovelock, investigaciones recientes indican la importancia fundamental del papel hidrológico de los bosques. Como señalan C. K. Boyce y sus colegas del Jardín Botánico de Missouri:

La capacidad de transpiración está estrechamente correlacionada con la densidad de las venas de las hojas y la densidad media de las venas de las hojas de las angiospermas es cuatro veces mayor que la de todas las demás plantas, vivas o extinguidas. Hace unos 100 millones de años se produjo por separado una rápida transición a densidades de venas elevadas en tres o más linajes de plantas con flores. La modelización climática del impacto de esta revolución fisiológica indica que los trópicos serían más cálidos, más secos y estacionales en ausencia de las angiospermas y la superficie total de la selva tropical disminuiría sustancialmente. Dado que la diversidad de las angiospermas está influida por la superficie de los bosques tropicales y por la abundancia y regularidad de las precipitaciones, la elevada diversidad de las angiospermas es en parte producto de un circuito de retroalimentación positiva con las modificaciones climáticas iniciadas por las propias angiospermas. Las diversificaciones de linajes entre animales vertebrados e invertebrados y plantas no angiospermas pueden estar ligadas al impacto sin precedentes de las angiospermas en el clima (Boyce *et al.*, 2010).

El extraordinario papel de la selva tropical dominada por las angiospermas para permitir el reciclaje de la lluvia mediante la evapotranspiración es una clara prueba de una relación similar a la de Gaia entre la biota y su entorno, incluida la regulación del clima

regional. En los años 70/80, el físico Eneas Salati utilizó la caída natural de los isótopos de hidrógeno y oxígeno asociados al agua para calcular el número de veces que las lluvias se reciclan cuando el aire fluye sobre la cuenca del Amazonas en su camino desde la costa brasileña hasta los Andes, a unos 3.000 kilómetros de distancia. Demostró que la lluvia sobre la parte brasileña de la cuenca del Amazonas se reciclaba 5 o 6 veces (**Salati, 1987**).

En su teoría de la bomba biótica, Anastassia Makarieva y Víctor Gorshkov ampliaron la noción de que los bosques tropicales manejan la física del ciclo hidrológico. Aportaron una explicación de por qué una alta tasa de transpiración, provocada por las angiospermas con sus hojas vasculares, debería ser de importancia crítica para mantener la selva tropical a miles de kilómetros de la fuente oceánica de las precipitaciones (**Makarieva & Gorshkov, 2007; Makarieva et al., 2013**)

En efecto, el alto índice de formación de nubes sobre los bosques tropicales, como los de la cuenca del Amazonas, el Congo y los bosques de latitudes más altas de Rusia (durante los meses de verano), provoca cambios de presión que atraen los vientos húmedos de origen oceánico que proporcionan las precipitaciones necesarias para mantener los bosques en el interior de los continentes. De hecho, la formación de nubes a partir del aire húmedo que se filtra hacia arriba desde el de la cubierta forestal, implica la condensación del vapor de agua y, por la física, sabemos que la reducción de volumen cuando el vapor se transforma en líquido o en hielo es superior a mil veces. Conociendo la cantidad de precipitaciones sobre la cuenca del Amazonas, una media de unos 2.500 milímetros anuales nos da una medida de las energías implicadas por la condensación. En energía equivalente a la explosión de varias bombas atómicas cada segundo. Repartidas en toda la cuenca del Amazonas, esas energías son suficientes para explicar los vientos alisios que traen aire húmedo al continente sudamericano y, con la ayuda de la selva, garantizan que las precipitaciones se reciclen correctamente desde la costa atlántica de Brasil hasta los Andes, a unos 3.000 kilómetros al oeste. En resumen, con base en la física de la evaporación y la condensación, la selva es responsable de los ríos atmosféricos de vapor de agua que proporcionan la lluvia estacional desde la Argentina hasta el Medio Oeste de Estados Unidos. (**Makarieva et al., 2014; Bunyard et al., 2019; Bunyard, 2014**).

El papel de Lynn Margulis para dar forma a la Hipótesis Gaia fue fundamental, y sin duda ayudó proporcionando credibilidad científica a la idea de Gaia, especialmente en lo que respecta a la forma en que los componentes bacterianos de la historia temprana de la vida en el planeta se incorporaron por simbiosis a células nucleadas de las que surgieron por evolución la multitud de especies animales, vegetales y fúngicas que hoy bendicen la Tierra. Estas especies, compuestas por organismos multicelulares con sus tejidos diferenciados, desarrollaron nuevas formas de interactuar con su entorno, ampliando así su influencia sobre la química planetaria. En efecto, Margulis aportó a la teoría de Gaia sus conocimientos sobre las interacciones de las bacterias con sus metabolismos y diversos atributos, de modo que formaron lo que ella denominó relaciones endosimbióticas. Como ella lo expresó junto con Ricardo Guerrero y Peter Bunyard:

La simbiosis ha sido el acicate de la evolución al dar lugar a combinaciones novedosas que permiten a organismos sean pioneros y generen nuevos hábitats (**Margulis et al., 1996**).

Además, con la evolución de las células nucleadas —eucariotas— a partir de las bacterias —procariotas— por medio de la simbiogénesis, las actividades metabólicas como la fotosíntesis y la respiración pudieron diseminarse ampliamente. La evolución de los árboles angiospermos, con sus hojas y tallos vascularizados y sus elevadas tasas de transpiración y fotosíntesis, es un buen ejemplo de la ampliación resultante de la incorporación de las cianobacterias, con su propio ADN separado, por simbiogénesis a las células eucariotas de las plantas para formar los cloroplastos. La propagación de los bosques, la evolución de las hierbas y la evolución del fitoplancton condujeron

simultáneamente al aumento de los niveles de oxígeno hasta su valor actual de 21% y a la deposición de dióxido de carbono en forma de combustibles fósiles y, asociado al calcio, como depósitos de carbonato.

Al invitarle a unirse a la NASA para buscar formas de encontrar vida en Marte, Lovelock tuvo la visión mental de mirar hacia la Tierra y preguntarse cómo había llegado a persistir la vida durante cerca de 4.000 millones de años, sobreviviendo incluso a varios eventos de extinción. La forma en que ese pensamiento condujo a la Hipótesis Gaia debe situarlo sin duda entre los grandes científicos de la historia. Lovelock ha cambiado fundamentalmente nuestra perspectiva de lo que debería ser la responsabilidad de la humanidad hacia la naturaleza. Dejó claro que el clima de la Tierra no es sólo una consecuencia de fuerzas físicas que escapan a nuestro control, como las oscilaciones de Milankovitch cuando la Tierra orbita alrededor del Sol, sino que es transformado por la fisiología biótica y el metabolismo.

Cuando Lovelock las expresó por primera vez, las ideas gaianas no fueron aceptadas inicialmente por la comunidad científica. Por ejemplo, los primeros informes de evaluación del comité científico del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), que datan de la década de 1990, calificaban los procesos vivos, aparte de las emisiones industriales antropogénicas, como impactos de segundo orden, con la deforestación, por ejemplo, encajando en esa categoría. En gran parte gracias a Lovelock y al consiguiente foco de estudio en las geociencias, la mayoría de los climatólogos han llegado a apreciar el papel de los ecosistemas esenciales, como la selva tropical o la tundra, para ayudar a regular los procesos que determinan el clima. Movimientos como la “Rebelión de la Extinción” deben su visión de la vida en la Tierra y de nuestra dependencia de esa vida en gran parte a Lovelock y a lo que él determinó que sería el estado del planeta si erradicáramos ecosistemas enteros. Por todo ello, tenemos una gran deuda con James Lovelock.

## Agradecimientos

El presente texto fue inicialmente redactado en inglés y gentilmente traducido al español por el Dr. Alberto Gómez Gutiérrez, FLS, a quien agradezco especialmente su apoyo y comentarios.

## Referencias

- Boyce, C.K., Lee, J.E., Field, T.S., Bodribo, T.J., Zwieniecki, M.A.** (2010). Angiosperms helped put the rain in the rainforests: the impact of plant physiological evolution on tropical biodiversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 97(4), 527-540. Doi: 10.3417/2009143
- Bunyard, P.P., Goldsmith E.** (1988). Gaia: The Thesis, the Mechanisms and the Implications. The Proceedings. Wadebridge Ecological Centre Conference.
- Bunyard, P.P., Hodnett, M., Peña, C., Burgos-Salcedo, J.D.** (2019). Further experimental evidence that condensation is a major cause of airflow. *DYNA*, 86(209), 56-63. <http://doi.org/10.15446/dyna.v86n209.73288>
- Bunyard, P.P.** (2014). How the Biotic Pump links the Hydrological Cycle and the Rainforest to Climate. Is it for Real? How can we prove it? Bogotá, Universidad Sergio Arboleda, Instituto de Estudios y Servicios Ambientales – IDEASA. ISBN: 978-958-8745-88-6. <http://hdl.handle.net/11232/397>
- Charlson, R.J., Lovelock, J.E., Andreae, M O., Warren, S.G.** (1987). Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326 (6114): 655-661. doi: 10.1038/326655a0
- Hitchcock, D.R., Lovelock, J.E.** (1967). Life detection by atmospheric analysis. *Icarus*, Volume 7, Issues 1-3, pp. 149-159.
- Lovelock, J.E.** 1972. Gaia seen through the atmosphere. *Atmospheric Environment* 6, 579-580.
- Lovelock, J.E.** ([1979] 2000). Gaia: A New Look at Life on Earth (3rd ed.). Oxford University Press. ISBN 0-19-286218-9.
- Lovelock, J.E.** (2007). The Revenge of Gaia: Why the Earth is Fighting Back and How We Can Still Save Humanity. Penguin Books.

- Lovelock, J.E., Giffen, C.E.** (1969). Planetary atmospheres: compositional and other changes associated with the presence of life, advanced space experiments (Ed. O. L. Tiffany and E. Zaitsev) pp. 179-193. American Astronautical Soc., Washington, D.C.
- Lovelock, J.E., Margulis, L.** (1974). Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia Hypothesis. *Tellus*, 26(1-2), 2-10, DOI: 10.3402/tellusa.v26i1-2.9731
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G.** (2007). Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1013-1033. doi: 10.5194/hess-11, 2007
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Sheil, D. Nobre, A.D., Li, B.L.** (2013). Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 1039-1056. doi: 10.5194/acp-13-1039-2013
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Sheil, D. Nobre, A.D., Bunyard, P.P., Li, B.L.** (2014). Why does Air Passage over Forest yield more Rain? Examining the Coupling between Rainfall, Pressure and Atmospheric Moisture Content. *Journal of Hydrometeorology*, 15(1), 411-426. Doi: 10.1175/JHM-D-12-0190.1
- Margulis, L., Guerrero, R., Bunyard, P.P.** (1996). We are all Symbionts. Chapter 12. Gaia in Action: Science of the Living Earth. (ed. Bunyard, P. P.) Floris Books.
- Molina, M., Rowland, S.** (1974). Stratospheric sink for chlorofluorocarbons: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249 (5460), 810-812.
- Salati, E.** (1987). The forest and the hydrological cycle. In R. Dickinson, Geophisiology of Amazonia. pp. 273-296. New York: Wiley and Sons.
- Watson, A.J.** (1996). The Gaia hypothesis: Mechanism and Tests. Chapter 4. Gaia in Action: Science of the Living Earth. (ed. Bunyard, P. P.) Floris Books.