

Es difícil detectar a Vida en la Tierra

The Anthropocene Review

0(0) 1–25

© The Author(s) 2020

Article reuse guidelines:

sagepub.com/journals-permissions

DOI: 10.1177/2053019620918939

journals.sagepub.com/home/anr



16/05/2020

Timothy M Lenton¹, Sebastien Dutreuil²
y Bruno Latour³

Traducción: Ignacio de Sobrino Burgos
Oficina Reserva Biosfera (Cabildo de Lanzarote)
07/07/2020

Resumen

El triunfo de la hipótesis Gaia fue detectar la extraordinaria influencia de Vida en la Tierra. “Vida” como el clado que incluye a todos los seres vivos existentes, a diferencia de “vida” como la clase de propiedades comunes a todos los seres vivos. “Gaia” sería entonces Vida más sus efectos en habitabilidad. La influencia de Vida en la Tierra fue difícil de detectar por varias razones: los biólogos la pasaron por alto porque pusieron el foco en la vida y no en Vida; los climatólogos la pasaron por alto debido a que Vida es difícil de ver en el balance energético de la Tierra; los científicos del sistema Tierra optaron en su lugar por una aproximación al sistema de la Tierra abiótica o centrada en la humanidad; los científicos en general fueron repelidos por los argumentos teleológicos de que Vida actúa para mantener sus condiciones habitables. En su lugar, nosotros razonamos desde los metabolismos orgánicos hacia afuera, mostrando cómo el acoplamiento de Vida a su ambiente ha tenido efectos profundos en la habitabilidad de la Tierra. Reconocer el impacto de Vida en la Tierra y aprender de él podría ser crucial para entender y navegar con éxito por el Antropoceno.

Palabras clave

Sistema Tierra, evolución, retroalimentación, Gaia, habitabilidad, International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), Vida, Lovelock, Margulis, National Aeronautics and Space Administration (NASA).

Introducción

Antes de ser el nombre de una hipótesis, Gaia fue el nombre de una nueva entidad (Lovelock 1972), definida como “la biosfera y todas aquellas partes de la Tierra con las que interactúa activamente” (Lovelock y Margulis, 1974a) – donde “biosfera” hacía referencia al “conjunto total de

¹University of Exeter, UK

²Aix-Marseille Université, CNRS, Centre Gilles Gaston Granger, Aix-en-Provence, France

³Sciences Po, France

Corresponding author:

Timothy M Lenton, Global Systems Institute, University of Exeter, Laver Building (Level 8), North Park Road, Exeter EX4 4QE, UK.

Email: t.m.lenton@exeter.ac.uk

organismos vivos” y “la Tierra” al planeta entero como un objeto en el sistema solar –. La hipótesis Gaia propuso que los seres vivos podrían regular colectivamente algunos aspectos de su ambiente abiótico global: la composición química de la atmósfera y los océanos, y potencialmente también el clima (Lovelock y Margulis, 1974a, 1974b; Margulis y Lovelock, 1974). La idea de “regulación” a menudo llevó a Lovelock a comparar Gaia con un organismo, y a veces con un termostato, ya que ambos son ejemplos comunes de fenómenos regulados.

Gaia se alimenta del surgimiento de la ciencia del sistema Tierra (ESS) (Lenton, 2016; Steffen et al., 2020) – donde “el sistema Tierra” ha sido definido de diferentes maneras que detallaremos a continuación –. Es a menudo utilizado para referirse a la entidad que soporta la vida en la superficie del planeta como distinta de gran parte del interior de la tierra y de su fuente de calor (Lenton, 2016). Más tarde, Lovelock diría a menudo que “el sistema Tierra” es solo un nombre alternativo y científicamente correcto para Gaia – sugiriendo que existe una entidad global singular que debería ser el foco de la atención científica –. Muchos científicos del sistema Tierra han seguido su ejemplo, tratando a Gaia y al sistema Tierra como sinónimos. Los biólogos, sin embargo, parecen reconocer que Gaia es una proposición distintivamente biológica, pero tienden a descartarla como una teoría inviable (Dawkins, 1982; Doolittle, 1981). Aquí, nosotros argumentamos que Gaia y el sistema Tierra son distintos y que estamos todavía en el proceso de descubrimiento de Gaia – no menos importante ya que diferentes disciplinas científicas han pasado por alto persistentemente la extraordinaria y variable influencia de Vida en la Tierra –.

A continuación, examinamos cuatro razones históricas claves por las que Gaia ha sido difícil de reconocer o de apreciar por numerosos científicos. Primero, examinamos el fallo de la biología al no detectar la mayor entidad viviente – que después de este trabajo etiquetaremos como “Vida” (con V mayúscula) para denominar el clado compuesto por todos los seres vivos derivados de un último ancestro común universal (Dutreuil, 2016, 2018; Mariscal y Doolittle, 2018) –. Segundo, destacamos la paradoja de que Vida es difícil de detectar en el balance energético de la Tierra, aunque en términos de información y orden (entropía negativa) está cambiando las cosas por todas partes y de forma radical. Tercero, examinamos el fallo de la ESS al estudiar Gaia, destacando cómo Gaia es distinta de varias definiciones del sistema Tierra (las cuales fueron en parte inspiradas por el concepto Gaia).

Además de buscar una explicación de por qué Vida ha sido difícil de detectar y Gaia difícil de apreciar, pretendemos señalar un camino hacia adelante. En vez de afirmar Gaia como una entidad, razonamos desde un punto de partida diferente: Revisamos las variadas influencias de Vida en la Tierra. Cuando se combinan estas influencias con las restricciones que las condiciones inertes imponen sobre Vida, esto inevitablemente conduce hacia una retroalimentación entre Vida y su ambiente, que incluye los requerimientos para la habitabilidad de Vida. Como resultado posible aparece un rango de dinámicas de “sistema complejo”, que incluye estabilización, desestabilización y regulación de condiciones habitables.

Esto nos lleva al cuarto y científicamente más desafiante aspecto de Gaia; que una entidad de escala global fuera conjurada exhibiendo un comportamiento dirigido hacia un propósito -la autorregulación de sus condiciones habitables. Esto aparentemente requiere un ingeniero o diseñador donde no existe ninguno. Tal razonamiento teleológico inmediatamente repele a muchos científicos (a pesar de que algunos empiecen a investigar las retroalimentaciones que implica la vida). Para los biólogos, este rechazo se agravó por la ausencia de un mecanismo evolutivo viable que lo explicara. Sin embargo, a medida que lo revisamos, el progreso teórico nos muestra que existe un mecanismo efectivo de filtrado por el cual los regímenes estabilizadores de retroalimentación tienden a persistir, incrementando la probabilidad de adquirir mecanismos estabilizadores adicionales. Esto podría explicar cómo Vida se ha visto involucrada en la regulación de las condiciones habitables (es decir, cómo ha surgido Gaia).

Tal mecanismo de filtrado implica necesariamente cometer errores – y la actual actividad humana, globalmente desestabilizante, parece ser el caso –. De este modo la ocurrencia del Antropoceno no refuta la existencia de Gaia. Sin embargo, “Gaia” y el “Antropoceno” representan diferentes marcos de referencia para entender los cambios globales, desde perspectivas opuestas. No es una coincidencia que Paul Crutzen (2002, 2004) – quien conoce a Lovelock desde los años setenta – eligiera criticar a Gaia solamente después de introducir el Antropoceno. Como tal, Gaia ofrece algo distinto de la versión del Antropoceno de la ESS – aporta un entendimiento diferente del mundo y de nuestro lugar en él, y algo de lo que podríamos aprender de manera útil (Lenton y Latour, 2018) –.

De la vida a Vida – el fallo de la biología al no ver la mayor entidad viviente

Para entender Gaia, uno necesita ver que Lovelock estaba interesado en una entidad biológica que no había sido estudiada anteriormente por los biólogos: la biota de “Vida” (V mayúscula). “Vida” designa una nueva entidad biológica, localizada en el espacio y en el tiempo y que comprende el conjunto total de todos los seres vivos derivados de un último ancestro común, que los biólogos designan como “clado”¹ (Doolittle, 2019; Dutreuil, 2016, 2018; Mariscal y Doolittle, 2018). Esto es diferente de “la vida” (v minúscula), la clase que designa las propiedades comunes de todos los seres vivos. Mientras que los biólogos estudian organismos, poblaciones, especies, etc., hasta hace muy poco no habían considerado a la longeva entidad Vida como un fenómeno a estudiar. Mientras el ambiente de los seres vivos incluye tanto organismos como aspectos abióticos, el ambiente de Vida es puramente abiótico ya que Vida incluye a todos los seres vivos. Gaia es más que solo Vida en tanto en cuanto incluye los efectos de esta en la habitabilidad. En efecto, la hipótesis Gaia proponía que Vida no habría sobrevivido sin afectar a sus propias condiciones de habitabilidad. Los biólogos carecen de interés en Vida, en sus efectos a gran escala y en lo que permite que esta persista a largo plazo, lo que resulta visible, por ejemplo, en el desarrollo paralelo de Gaia y la “teoría de construcción de Nicho” (Laland et al., 2016). Esta teoría, desarrollada después de Lewontin (1983), también enfatizaba la importancia de los efectos que los seres vivos tienen en su ambiente – y los potenciales efectos adaptativos que pueden sobrevenir – pero los ejemplos empíricos sobre los que se ha trabajado son mayormente locales (presas de castores, nidos de pájaros, etc) (Dutreuil y Pocheville, 2015) –.

Además de no detectar ni a Vida ni a Gaia, los biólogos evolutivos malinterpretaron y malentendieron la idea de “regulación” u “homeostasis” en Gaia como algo similar a un bien común. En su vocabulario, se vio como algo que incrementa la aptitud de todos los seres vivos individuales – que debería explicarse por el altruismo – es decir, comportamientos que son costosos (en aptitud) por los individuos que los realizan pero beneficiosos para el colectivo (Kerr et al., 2004). A pesar de todo, la total ausencia de vocabulario y de marcos teóricos de los biólogos evolutivos (por ejemplo: aptitud, análisis coste-beneficio, tramposos-altruistas) – a favor del lenguaje cibernético en la prosa de Lovelock (1979) –, junto con las fuertes críticas de Margulis a los análisis coste-beneficio subyacentes en todas las discusiones sobre cooperación en biología, deberían haber alertado a los biólogos sobre el hecho de que Lovelock y Margulis estaban detrás de algo más que de explicar un altruismo putativo global.

Estas dos discrepancias – respecto a la escala de las entidades vivientes consideradas y a los aparatos teóricos para estudiar la regulación – están netamente encapsuladas en esta cita de Doolittle (1981):

...la recompensa por buenos (Gaianos) comportamientos son tan remotas como las penalizaciones por mal comportamiento. Es difícil de aceptar que los comportamientos cuyos efectos en la composición atmosférica

u oceánica o en la temperatura global no se sentirán durante miles de generaciones puedan ser seleccionados, especialmente cuando los primeros beneficiados de esos efectos puedan ser organismos que no han sido responsables de ellos. (p.61)

Claramente Lovelock (Vida) y Doolittle (vida) no estaban preocupados por las mismas entidades – o al menos no en ese momento – Doolittle está ahora bastante interesado en Vida (Doolittle, 2019; Mariscal y Doolittle, 2018).

La paradoja de la invisible Gaia

Vida ha sido difícil de detectar en la Tierra por una simple razón: es casi invisible en el balance energético del sistema Tierra. Vida está impulsada solo por una pequeña fracción del total de la energía solar absorbida. Sin embargo, en términos de entropía negativa y de información, Vida está cambiando las cosas por todas partes y de manera radical. Con esa pequeña fracción de energía disponible, Vida ha alterado profundamente la composición atmosférica – y por lo tanto los flujos de energía de onda larga de la Tierra – y ha cambiado significativamente el albedo planetario – y en consecuencia los flujos de energía de onda corta de la Tierra –, ejerciendo así un apalancamiento considerable sobre el balance energético general. Esta capacidad tiene que provenir de la calidad informacional de Vida. Así, las visiones energéticas y entrópicas de Vida son muy diferentes.

Los organismos fotosintéticos logran convertir de media solamente $\sim 0,5 \text{ Wm}^{-2}$, o el $\sim 0,3 \%$ de los $\sim 180 \text{ Wm}^{-2}$ de la radiación solar que incide en la superficie de la Tierra, en energía química en forma de azúcares en producción primaria bruta. Este aporte total de energía libre de $\sim 264 \text{ TW}$ (Dyke et al., 2011) es la fuente de alimentación de Vida. Aproximadamente la mitad es respirada por los organismos fotosintéticos, y la otra mitad proporciona producción primaria neta (suministro de alimento) para el resto de Vida. Este suministro energético es pequeño comparado con el balance energético radiativo del planeta (el cual absorbe entre ~ 120.000 y $\sim 80.000 \text{ TW}$ en la superficie) y modesto en comparación con los $\sim 900 \text{ TW}$ de suministro energético disponible solo en la circulación atmosférica (Dyke et al., 2011). Sin embargo, es considerablemente mayor que el suministro energético en superficie proveniente de la fuente interna de calor de la Tierra (Dyke et al., 2011; Rosing et al., 2006).

Vida tiene una mano algo más grande para alterar el albedo superficial de la Tierra y por tanto el total de $\sim 160 \text{ Wm}^{-2}$ de radiación solar absorbida en la superficie. Solo una pequeña fracción de los fotones absorbidos por los organismos fotosintéticos son convertidos con éxito en energía química, por lo que la absorción total de luz solar usada para fijar carbono en la fotosíntesis es mayor de $\sim 1,8 \text{ Wm}^{-2}$ (Dykes et al., 2011). Correspondientemente, la vegetación disminuye por lo general el albedo de la superficie terrestre, particularmente en las altas latitudes boreales (Betts, 2000), aunque los pastizales pueden incrementar el albedo relativo al suelo desnudo. El fitoplancton también genera un menor albedo en la superficie de los océanos, resultando en una absorción extra de $\sim 0,25 \text{ Wm}^{-2}$ (Frouin e Iacobellis, 2002), a pesar de que las floraciones de coccolitóforos, con sus miembros calcáreos, incrementan el albedo en superficie. Estos efectos biológicos sobre el albedo de la superficie pueden verse claramente en el espectro visible, incluso desde el espacio (Sagan et al., 1993), y algunos eran muy familiares mucho antes de la hipótesis Gaia, aunque su modesta magnitud apenas suponía un indicio de la existencia de Vida.

Vida incrementa la evapotranspiración en tierra, enfriando la superficie y afectando a la cubierta de nubes. Esto ha sido apreciado durante mucho tiempo, aunque mayormente visto como un efecto local o regional. La mayoría de los $\sim 80 \text{ Wm}^{-2}$ perdidos desde la superficie de la Tierra en aguas evaporadas provienen del océano.

Ahora sabemos que Vida ha incrementado tanto el albedo atmosférico como el de las nubes a través de la producción de aerosoles y de núcleos de condensación de nubes (CCN) que dispersan la radiación solar, afectando a esos $\sim 80 \text{ Wm}^{-2}$ de radiación solar incidente absorbida por la atmósfera y a los $\sim 80 \text{ Wm}^{-2}$ reflejados por las nubes. Sin embargo, el descubrimiento de estos efectos ampliamente posterga (y ha sido inspirado por) la hipótesis Gaia. Cuando vemos simplemente la física del albedo de la atmósfera y las nubes (e incluso la química del aerosol que conduce a ella), los conductores biológicos subyacentes (cuando están presentes) están bien escondidos.

Los mayores efectos de Vida en el balance energético de la Tierra aparecen por la alteración de la composición atmosférica y en consecuencia los flujos de onda larga. La atmósfera absorbe $\sim 360 \text{ Wm}^{-2}$ de los $\sim 400 \text{ Wm}^{-2}$ irradiados por la superficie de la Tierra y re-irradia $\sim 330 \text{ Wm}^{-2}$ de vuelta a la superficie – un fenómeno comúnmente conocido como “efecto invernadero” –. Vida tiene un mayor impacto en el “efecto invernadero” al alterar la composición atmosférica – aunque esto está bien oculto cuando solo nos fijamos el balance energético –. Su descubrimiento marcó el comienzo de hipótesis Gaia.

El hecho de que Vida sea difícil de detectar en el balance energético del sistema Tierra – tanto en términos del pequeño suministro energético directo de Vida como en la ampliamente indirecta y por tanto invisible naturaleza de las influencias biológicas en los flujos de radiación – puede ser una razón clave por la que los climatólogos a menudo han ignorado la hipótesis Gaia. Existen notables excepciones (McGuffie y Henderson - Sellers, 2014). Sin embargo, muchos prefieren ver el sistema climático como un “motor térmico” gigante que tan solo redistribuye y degrada la energía libre (baja entropía, radiación de onda corta) proveniente del sol, usándola para realizar trabajos como el movimiento de la atmósfera, los océanos y el ciclo hidrológico.

Desde Gaia a los sistemas Tierra – perdiendo de vista a Vida

Gaia se inició con el reconocimiento de un nuevo objeto biológico – Vida – y sus efectos en la composición atmosférica y por tanto sus propias condiciones de habitabilidad. Se estudió la expansión de Vida y sus conexiones con sus alrededores, cristalizando nuevos problemas científicos – tales como el entendimiento de su mantenimiento en el tiempo –. El enfoque de Gaia sobre la longeva entidad Vida también señala la diferencia entre Gaia y varios conceptos y definiciones “del” sistema Tierra – particularmente lo que llamaremos los sistemas Tierra de la “NASA” y el “IGBP” –. Desde un punto de vista histórico, Gaia ha influenciado estas concepciones del sistema Tierra pero, a pesar de un reconocimiento compartido de las interacciones entre los seres vivos y su ambiente, lo que constituye el fascinante núcleo del concepto Gaia – la centralidad de Vida – nunca fue adoptado por ellos. Aquí, contrastamos las diferentes concepciones de Gaia y del sistema Tierra, tocando su contexto histórico y enfocándonos en el marco normativo de donde surgieron sus definiciones. La tabla 1 resume la diferente manera en la que sus límites están delineados.

Gaia

El reconocimiento y la definición de Gaia derivan de dos fuentes diferentes. La primera, enfatizada por Lovelock, fue la detección de vida en otros planetas. Pensando sobre este hecho, Lovelock (1965) llegó a reconocer, y luego a enfatizar firmemente (Lovelock, 1972), que la impronta de Vida en la Tierra es visible en la constitución de la atmósfera, mantenida en desequilibrio químico por el metabolismo de los seres vivos productores de oxígeno y metano (y otros gases reducidos). La segunda fuente de reflexión para Lovelock proviene de sus actividades diarias como consultor

tanto para grandes instituciones científicas de las ciencias de la Tierra (tales como la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, NOAA, o el centro Nacional de Investigación Atmosférica, NCAR) como para industrias químicas y petroleras. Armado con su Detector de Captura de Electrones, Lovelock cruzó los océanos y la atmósfera y encontró entidades químicas producidas por los seres vivos, por ejemplo, el sulfuro de dimetilo (DMS) (Lovelock et al., 1972), y por actividades humanas, por ejemplo, los clorofluorocarbonos (CFCs) (Lovelock et al., 1973).

Table 1. Different recipes for identifying Gaia and variants of the Earth system.

Entity	Recipe for identification
Gaia	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identify all living beings on Earth. 2. Trace the material interactions between these living beings and what is outside their membranes. 3. Establish which of those connections are relevant to habitability. 4. Gaia is the entity isolated by the resulting network of connections.
NASA Earth system	Identify all processes occurring on Earth and the way they interact
IGBP Earth system	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identify human conditions of existence. 2. Connect these conditions of existence to all known material processes affecting them.

NASA: National Aeronautics and Space Administration; IGBP: International Geosphere-Biosphere Programme.

Pensar en Vida vista desde el espacio, por un lado, y trazar las delicadas conexiones químicas entre Vida (incluyendo a los humanos) y su ambiente, por el otro lado, nos lleva al reconocimiento de una nueva entidad y al seguimiento de sus límites, redefiniendo nuestras concepciones de Vida y del ambiente. Si los seres vivos *producen* aspectos de su ambiente, entonces sus límites materiales ya no terminan en sus membranas y epidermis, sino que se expanden tan lejos como alcance su influencia en el ambiente. Así, lo que fue antaño pensado como “abiótico”, como la atmósfera, puede ser visto ahora como una parte viva “como la piel de un visón o la concha de un caracol” (Lovelock, 1972).

Trazar los límites de Gaia requiere (1) identificar todos los seres vivos (bacterias, caballos, etc.) en la Tierra, (2) trazar cuidadosamente las interacciones y conexiones químicas y materiales entre estos seres vivos y lo que hay fuera de sus membranas, (3) establecer cuáles de estas conexiones son relevantes para la habitabilidad (o para la persistencia de Vida) y (4) reconocer Gaia como una entidad aislada por la red resultante de conexiones. Reconocer y medir la masiva influencia de los seres vivos en su ambiente, por un lado, y pensar en el rompecabezas de la estabilidad a largo plazo de la Tierra, por otro lado, conduce a la hipótesis de que es precisamente lo primero lo que explica lo último.

National Aeronautics and Space Administration (NASA)

La definición del sistema Tierra de la NASA estuvo guiada por otros imperativos durante los años ochenta. La NASA necesitaba un programa de investigación audaz y ambicioso para prevenir los masivos recortes en la financiación prometida por la administración de Reagan argumentando que ya habíamos visitado el sistema solar (Goldstin, 2009). Así, la agencia *espacial* se volvió hacia la Tierra desarrollando un programa de nuevos satélites de mil millones de dólares (Conway, 2018). Los cambios globales (el cambio climático y el agujero de la capa de ozono) y el reciente surgimiento de la tectónica de placas dieron una nueva visión de la Tierra, más dinámica e interconectada de lo que se reconocía anteriormente. Los dos masivos resultados de la Geofísica de la Guerra Fría – la tectónica de placas y la climatología – junto con sus programas e

instituciones (Doel 2003; Edwards, 2010; Hamblin, 2013; Turchetti y Roberts, 2014), pavimentaron de este modo el camino a la comprensión de que el sistema Tierra es un objeto *real* que comprende “componentes físicos, químicos, biológicos y humanos” y visto como “un juego relacionado de procesos que interaccionan operando en un amplio rango de escalas espaciales y temporales, más que una colección de componentes individuales” (NASA ESSC, 1986). En su conjunto, debe así ser estudiado de una manera interdisciplinar, uniendo biogeoquímica, climatología, oceanografía, geofísica de la Tierra sólida, etc. El programa de ESS de la NASA necesitaba el apoyo tanto de la comunidad fluida de la Tierra, como de la geofísica de la Tierra sólida: de este modo, se incluían todas las escalas temporales de la historia de la Tierra (NASA ESSC, 1986). Con el fin de organizar el trabajo científico de una manera interdisciplinar, la NASA propuso estructurar el programa de acuerdo a las escalas temporales de los procesos estudiados (en lugar de en base a su naturaleza material – biológica, física y química – como habían hecho tradicionalmente las disciplinas).

Delinear los límites del sistema de la Tierra de la NASA requiere así identificar todos los procesos que suceden en la Tierra y la manera en la que interactúan. Nótese aquí la principal diferencia con Gaia: no se empieza con Vida. Como consecuencia, puede haber un sistema Marte del mismo modo que puede haber un sistema Tierra (y un estudio de la climatología de Marte, tectónicas pasadas, etc.) incluso si no hubiera vida en Marte. Mientras no se detecte vida, una “Gaia Marciana” no tendría sentido. Correspondientemente, la ESS de la NASA se centra en la presencia de agua líquida como la condición sine qua non de habitabilidad – lo cual es una definición abiótica del potencial para la vida –. Esto conduce a la definición de una “zona habitable” (alrededor de una estrella dada) en términos del rango de temperaturas superficiales en el cual un planeta puede retener agua líquida. Así, la NASA elige una definición abiótica de habitabilidad y pierde de vista a Vida en el sistema Tierra.

International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP)

El IGBP fue la institución que hizo todo lo posible por sacar adelante la idea de “cambio global” y de expandirla más allá de una pura física del clima para incluir tanto ciclos biogeoquímicos como aspectos humanos (Dutreuil, 2016; Kwa, 2005a, 2005b, 2006; Kwa y Rector, 2010; Uhrqvist, 2014). En los comienzos del IGBP, existía una tensión interna entre los que proponían un programa de investigación que apuntara a un entendimiento y predicción del futuro “guiado por motivaciones socioeconómicas” y aquellos que abogaban por que el programa de investigación del IGBP fuera un “desafío intelectual, guiado por la necesidad científica de mejorar el entendimiento de la totalidad del sistema terrestre y su biota y la respuesta de este sistema a las entradas externas y las influencias antropogénicas” (Roederer, 1986). Esta tensión desapareció a finales de los 90, durante la gran síntesis del IGBP (Steffen et al., 2004), cuando la definición del “sistema Tierra” se puso a la vanguardia. Ahora bien, estaba claro que el imperativo era estudiar los cambios globales que afectaban a la existencia humana. Schellnhuber propuso una formalización de la idea de un desarrollo sostenible que mantuviera la habitabilidad de la Tierra (Schellnhuber, 1999; Schellnhuber y Wenzel, 1998). Crutzen y Stoermer (2000) introdujeron más tarde el concepto de Antropoceno, antes de la elaboración de otros conceptos clave como los “puntos de inflexión” y los “límites planetarios” (Rockström et al., 2009).

Mientras que habitabilidad en Gaia significaba condiciones suficientes para que Vida persistiera, habitabilidad en el contexto del IGBP significaba habitabilidad para los seres humanos. Identificar el sistema terrestre del IGBP y sus límites requiere así (1) identificar las condiciones humanas de existencia y (2) conectar estas condiciones de existencia con todos los materiales y procesos conocidos que las afectan. El programa de investigación del IGBP estuvo guiado por el imperativo de entender cómo los cambios globales *afectarán las condiciones de la existencia humana en el*

futuro. Por ejemplo, el estudio del *pasado* del sistema Tierra (capitanado por el proyecto PAGES) está muy restringido a la historia reciente de la Tierra, debido a que esta puede darnos datos cuantitativos útiles con los que elaborar proyecciones de futuro. Así, el IGBP perdió de vista a Vida al centrarse más estrechamente en lo que requiere la vida humana.

Otros contextos

La etiqueta de “sistema Tierra” se ha difundido en otros contextos, aunque ninguno de estos ha situado a Vida en el centro. El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) en algún momento incluyó la etiqueta de “sistema Tierra” tras el importante papel del IGBP en el Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (WCRP). Aquí, el “modelo de sistema Tierra” se usa para designar modelos que incluyen una dinámica cíclica de carbono (Dahan, 2010; Heumann y Dahan Dalmedico, 2019). Esto está lejos de representar la complejidad y riqueza de lo que la Tierra es para el IGBP, la NASA o Gaia. En otros campos, también conectados con Gaia y Lovelock, “sistema Tierra” se usa a menudo para describir interacciones a largo plazo entre la biosfera y la geosfera (Lenton et al., 2004). En geoquímica, “sistema Tierra” se usó para recalcar la importancia de la retroalimentación vis-a-vis como un modelo simple de circulación de materia (flujos y reservorios) elaborado por primera vez por Bob Garrels (Berner, 1999; Kump, 1988; Lenton y Watson, 2011; Lovelock, 1986). La física de la Tierra sólida también usa a veces la etiqueta “sistema Tierra” para recalcar el importante carácter dinámico de la Tierra (Condie, 2005; Rollinson, 2007).

Similitudes y distinciones

Una novedad importante, común a todos los sistemas terrestres mencionados, es el estudio *interdisciplinar* de un objeto global (que cruza entidades biológicas, químicas y físicas), *desde una perspectiva particular*. Una “perspectiva” (Wimsatt, 1994) es lo que restringe la descomposición de un objeto en partes o procesos y los problemas científicos a resolver desde esta perspectiva. Esta perspectiva difiere para cada “sistema” (Tabla 1): Gaia empieza con Vida y sigue sus conexiones materiales con el ambiente y el modo en el que estos afectan la habitabilidad de la Tierra durante toda su historia; la NASA intenta identificar todos los procesos vinculados en una escala temporal dada; el IGBP se esfuerza por desenredar los procesos que afectan a la futura prosperidad de los humanos. Estas diferencias tienen consecuencias sobre cómo es tratado un aspecto particular “del” sistema Tierra: por ejemplo, la concepción del IPCC normalmente trata a los humanos como si estuvieran fuera del sistema Tierra (en esos escenarios la actividad humana actúa como un factor externo que fuerza los modelos del sistema Tierra, cuyos resultados luego impulsan los modelos de impacto de las consecuencias), mientras que el IGBP reconoce que los humanos claramente se hayan dentro del sistema Tierra.

Diferentes sistemas Tierra implican diferentes nociones de habitabilidad. En particular, la NASA ve el marco planetario (el sistema Tierra) como “habitable”, mientras que Gaia ve a Vida afectando profundamente a sus propias condiciones de supervivencia y florecimiento, y el IGBP se centra en aquello que es habitable para los humanos y cómo estos están afectándolo.

Los conceptos cibernéticos – los cuales se llamarían ahora conceptos de sistemas complejos –, mientras que fueron ampliamente usados por Lovelock en su formulación de Gaia, están enormemente ausentes en la formulación de la ESS de la NASA, la cual solo recalca las interacciones entre los componentes del sistema Tierra, a pesar de que mostraba numerosos bucles de retroalimentación en el famoso “diagrama de Bretherton” (NASA ESSC, 1986). Encarnaciones posteriores de la ESS han puesto más énfasis en la retroalimentación, y la Declaración de Ámsterdam de 2001 del IGBP ha ido tan lejos como para sugerir que “el sistema

Tierra se comporta como un sistema singular autorregulado”. Sin embargo, se detuvo en seco antes de decir que se regula "hacia" – es decir, antes de asignar un propósito al sistema – lo que podrían ser condiciones habitables en la formulación – es decir, homeostasis –. Esto es posiblemente una consecuencia de no tener centrada la definición del sistema en Vida. Esta atribución de una función de propósito es una de las principales objeciones a Gaia, a la que volveremos en la sección “Desde la afirmación de funciones con objetivo a una teoría viable”.

Las variadas influencias de Vida en su entorno material

Habiendo destacado por qué Vida ha sido difícil de detectar o ha sido marginada desde las perspectivas de la biología, la climatología y la ESS, revisaremos ahora brevemente la influencia de Vida en la Tierra. Esto retiene el aparente estudio procesal en los buenos tiempos de la elaboración de Gaia – capturado por Latour (2017): Nos esforzamos para hacer visible a Gaia localizando la influencia de Vida en su ambiente –.

Composición atmosférica

Lovelock originalmente se dio cuenta del profundo impacto de Vida en el balance de gases de la atmósfera terrestre, creando un extraordinario estado de desequilibrio termodinámico (Hitchcock y Lovelock, 1967; Lovelock, 1965; Lovelock y Giffin, 1969).

La concentración de oxígeno al ~21 % que tiene la atmósfera actualmente es un producto casi exclusivamente biológico (de la fotosíntesis oxigénica de cianobacterias, algas y plantas), concentración que sería de $\sim 10^{-12}$ atm en superficie en ausencia de Vida (Haqq-Misra et al., 2011). La concentración de metano en esta atmósfera rica en oxígeno es un factor de $\sim 10^{30}$ mayor de lo esperado en equilibrio, así como las concentraciones de hidrógeno y amoníaco (Lovelock, 1975b). Este extraordinario orden (entropía negativa) en la composición atmosférica solo puede explicarse por una entrada de energía libre por parte de la Vida fotosintética. Se estima que son necesarios ~0,7 TW solo para mantener la coexistencia $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ (Simoncini et al., 2013).

El dióxido de carbono (CO_2) es extraordinariamente escaso en la atmósfera terrestre cuando lo comparamos con Marte y Venus (cuyas atmósferas están dominadas por CO_2 ; Lovelock, 1972). A pesar de las actividades humanas actuales, Vida ha hecho que el CO_2 pase de ser un componente dominante de la atmósfera a ser un gas de seguimiento, encerrando el carbono orgánico en las rocas sedimentarias y acelerando la meteorización de las rocas silíceas y la resultante deposición de los sedimentos carbonatados. En ausencia de Vida, el CO_2 atmosférico sería de 10 a 100 veces más alto, produciendo un forzamiento radiativo de ~ 10 a $\sim 20 \text{ Wm}^{-2}$ (Schwartzman y Volk, 1989).

Trabajos recientes sugieren que Vida también ha disminuido la presión atmosférica al transferir nitrógeno (el principal componente de la atmósfera) a la corteza, fijando N_2 atmosférico y secuestrando parte del resultante nitrógeno orgánico en las rocas sedimentarias (Johnson y Goldblatt, 2018). Esto debilita el efecto invernadero al reducir la “ampliación de la presión” de líneas de onda larga de otros gases, un efecto que supera la reducida dispersión de Rayleigh de la radiación solar por el N_2 (Goldblatt et al., 2009).

Otros gases biogénicos generan aerosoles y ocasionalmente núcleos de condensación de nubes (CCN), afectando principalmente al balance de la radiación de onda corta de la Tierra. El DMS biogénico (Lovelock et al., 1972) producido por un rango de fitoplancton marino se oxida para formar CCN biogénicos, un incremento de densidad que aumenta el albedo de las nubes de estratocúmulos marinas (Charlson et al., 1987), generando un forzamiento radiativo de alrededor de -1 Wm^{-2} (Boucher et al., 2003). Las macroalgas de cerca de costa también producen un rango

de aerosoles y precursores de CCN, que incluyen yoduro de metilo (Lovelock, 1975a). La vegetación emite grandes cantidades de isopreno, terpenos y otros compuestos volátiles de carbono (BVOCs) que también pueden ser una fuente de aerosoles y de CCN (Kesselmeier y Staudt, 1999).

Ciclos biogeoquímicos

Los organismos vivos están hechos de un rango de elementos en proporciones estequiométricas que contrastan a veces significativamente con su abundancia natural en la superficie terrestre. De manera importante, las entradas de esos elementos esenciales en formas bio-disponibles desde y hacia la superficie terrestre son generalmente pobres en comparación con el total de los requerimientos de Vida. Así, para que Vida florezca, debe incrementar las entradas y/o (re)ciclar los elementos esenciales que necesita (Volk, 1998). Además, la entrada y/o reciclaje necesita ser mayor para aquellos elementos que son escasos en relación a sus requerimientos biológicos que para aquellos menos escasos en relación a sus requerimientos biológicos. La Tabla 2 resume algunos de los efectos de Vida en el ciclado de materiales.

El carbono es la columna vertebral de la química orgánica, y los flujos fotosintéticos y respiratorios de carbono exceden las entradas a la superficie terrestre desde el manto y el reciclaje tectónico de las rocas sedimentarias en un “ratio de ciclado” global de alrededor de 400. La entrada de carbono a la superficie desde el reciclado tectónico de sedimentos se ve a su vez incrementada de alguna manera por Vida, ya que el reservorio de carbono sedimentario orgánico se debe por completo a Vida y su oxidación depende de una atmósfera biogénica rica en oxígeno (Lenton et al., 2018b). Además, el plancton ha cambiado en cierta medida la localización de la deposición carbonatada desde las plataformas continentales a las profundidades oceánicas, aumentando el reciclaje tectónico del carbono carbonatado (Volk, 1989). Incluso la supuesta entrada de carbono “desde el manto” es en parte producto de lo que fue una vez carbono orgánico subducido (Foley y Fischer, 2017).

El nitrógeno tiene un ciclo esencialmente biológico en el cual los organismos son responsables de todas las transformaciones clave. La entrada de nitrógeno bio-disponible (NO_3 y NH_4) se ha visto incrementada por un factor de ~40 por la fijación biótica de nitrógeno (antes de la actividad humana) en relación a las pequeñas fuentes abióticas provenientes de la caída de rayos (Fowler et al., 2013). El consumo de nitrógeno en producción primaria neta es ~100 veces mayor todavía, indicando un ratio de ciclado global de nitrógeno de ~100.

El fósforo no tiene una presencia gaseosa significativa y todo deriva en última instancia de la meteorización química continental. La meteorización del fósforo se ve amplificada por Vida, en un factor incierto, a través de innovaciones que incluyen la producción orgánica de ácido y la disolución selectiva de inclusiones de los apatitos ricos en fósforo de las rocas. Además, alrededor del 20% del flujo de meteorización de fósforo deriva de las rocas sedimentarias cuya deposición depende de Vida (Lenton et al., 2018b). El consumo de fósforo en producción primaria neta excede a la meteorización en un factor de ciclado global de ~1250, mayor que el del nitrógeno o el del carbono, consistente con el hecho de que el fósforo es el “nutriente limitante último”.

El azufre es ampliamente usado por Vida en proporciones variadas (y notablemente poco conocidas) (Linzon et al., 1979; Matrai y Keller, 1994). Vida amplifica las entradas de azufre en un factor de ~30 cuyas entradas están dominadas por el reciclaje de sedimentos (Lenton et al., 2018b) más que por las entradas desde el manto (Kagoshima et al., 2015) y las dos principales formas de azufre sedimentario son atribuibles a Vida: la piritita es un producto biogénico y el yeso requiere oxígeno para producir el sulfato que contiene. El consumo de azufre en producción primaria neta excede aún más la entrada de azufre en un ratio global cíclico de ~10-40.

El silicio es requerido por las plantas y diatomeas (aunque no por todos los productores primarios) con una entrada por meteorización que se ve biológicamente potenciada en un factor no determinado (Struyf et al., 2009).

Table 2. Effects of life on material cycling.

Element/compound	Abiotic input (mol yr ⁻¹)	Biotic (pre-human) input (mol yr ⁻¹)	Biotic use in NPP (mol yr ⁻¹)	Biotic amplification of input ^a	Biotic global cycling ratio ^b	References
O ₂	4 × 10 ¹¹	1 × 10 ¹⁶	(1 × 10 ¹⁶)	25,000	(N/A)	Haqq-Misra et al. (2011)
C	2.2 × 10 ¹³	2.7 × 10 ¹³	1 × 10 ¹⁶	~1.2	~370	Lenton et al. (2018b)
N	3.5 × 10 ¹¹	1.5 × 10 ¹³	1.5 × 10 ¹⁵	~40	~100	Fowler et al. (2013)
P	~2 × 10 ¹⁰	4 × 10 ¹⁰	5 × 10 ¹³	~2	~1250	Lenton et al. (2018b)
S	1.2 × 10 ¹¹	3.2 × 10 ¹²	(3–12) × 10 ^{13c}	~27	~10–40	Kagoshima et al. (2015); Lenton et al. (2018b)
Si	?	(1.9–4.6) × 10 ¹³	(3–4.4) × 10 ¹⁴	?	~10 (6.5–15)	Struyf et al. (2009)

NPP: net primary production.

^aRatio of biotic to abiotic input.

^bRatio of biotic use to biotic input.

^cEstimated from marine phytoplankton C: S ~50–200 (Matrai and Keller, 1994) and terrestrial plant C: S ~300–600 (Lirzon et al., 1979).

Las plantas toman ~10 veces la entrada proveniente de la meteorización e inmovilizan el Si en materia orgánica, reduciendo la entrada al mar desde los ríos, donde las diatomeas toman ~40 veces la entrada desde los ríos, lo que indica que el reciclado marino excede el ratio global de reciclado de ~10.

Un amplio rango de micro-nutrientes es necesario para la producción primaria, o para otros metabolismos clave, como la fijación de nitrógeno. La abundancia de metales pesados, en relación a los requerimientos de Vida, varía y ha cambiado con el cambio del estado de oxidación de los ambientes de la superficie terrestre (Saito et al., 2003; Withfield, 1981; Williams y Fraústo da Silva, 2006). Vida a su vez ejerce una influencia variada en el ciclado de los metales pesados hoy en día, particularmente a través de la producción de ligandos orgánicos de fuerza variada (Benner, 2011; Sunda, 2012).

A pesar de ser el yodo el elemento más pesado comúnmente usado por Vida, los compuestos orgánicos volátiles de yodo, principalmente yoduro de metilo, son creados en abundancia por los organismos marinos. Estos juegan un importante papel en la química atmosférica y la formación de aerosoles y ciclan algo de yodo de vuelta desde el océano a la tierra (Lovelock et al., 1973). Existe también un considerable ciclado terrestre de yodo llevado a cabo por Vida (Amachi, 2008). Algunos elementos no son requeridos biológicamente; por lo tanto, no existe un incentivo para que Vida altere su ciclado. Sin embargo, el ciclado puede ocurrir como consecuencia accidental de la incorporación química de estos a productos biológicos, o como consecuencias químicas de un producto biológico. Un ejemplo famoso de esto último son los reactores nucleares de fisión de origen natural en Oklo, Gabón, datados en ~1,7 Ga, que requieren el previo aumento del oxígeno atmosférico ocurrido en la Gran Oxidación para concentrar ²³⁵U fisionable (Gauthier-Lafaye et al., 1996).

Ciclado de rocas, formación de continentes y retención de agua

Una fracción importante de la diversidad de los minerales de la Tierra, o bien es precipitada biológicamente, o bien requiere oxígeno (un producto biológico) para su creación y por lo tanto no existiría sin Vida (Hazen et al., 2008). Más fundamentalmente, se ha propuesto que Vida ha alterado el ciclo de rocas del planeta y jugado un importante rol en la formación de los continentes. Vida claramente tiene el potencial energético para hacerlo – su actual suministro de potencia (264

TW) excede la potencia de convección del manto (~12 TW) en un factor de >20 y la del ciclado de la corteza (~26 TW) en un factor de ~10 (Dyke et al., 2011) –. También excede el trabajo realizado por el motor de calor atmosférico en meteorización física (<50 TW) y transporte de sedimentos (<13 TW) (Dyke et al., 2011).

La producción de la corteza continental como granito requiere hidratación de la corteza oceánica (Campbell y Taylor, 1983). Recientemente, se ha hipotetizado que la Vida temprana hidrató la corteza del fondo marino al permeabilizarla y así empezó la formación de micro-continentes ~4.0-3,5 Ga (Grosch and Hazen, 2015). Si se corroborara un vínculo con la formación de continentes, esto representaría una consecuencia extraordinaria de Vida.

Si la Tierra hubiera o no perdido su agua en ausencia de Vida, haciendo el planeta inhabitable, es una pregunta abierta. En ausencia de Vida, sin la mejora biótica de la meteorización y posiblemente sin continentes, el CO₂ atmosférico y la temperatura serían mucho mayores, arriesgándose a cruzar el punto de no retorno de una atmósfera tipo “invernadero húmedo” que potenciaría unos mayores ratios de pérdida de hidrógeno al espacio (Popp et al., 2016). Además, al producir una atmósfera rica en oxígeno, una capa de ozono, y la fuerte estratificación térmica de la estratosfera, Vida ha creado una “trampa fría” efectiva en la tropopausa que previene que el agua alcance la parte superior de la atmósfera donde puede descomponerse, perdiéndose el hidrógeno en el espacio. Dicho esto, antes de causar el aumento del oxígeno atmosférico, los metanógenos primigenios probablemente potenciaron la pérdida de hidrógeno al espacio al incrementar la concentración de metano en la atmósfera (Catling et al., 2001).

Distinguiendo las perspectivas de Gaia y del sistema Tierra

Los biólogos han tenido poco interés en la influencia de Vida en el ambiente global – lo que es comprensible dado que la composición del clima y los océanos no son su mayor objeto de estudio. Los científicos del sistema Tierra han estado estudiando cada vez más la influencia de los seres vivos en el ambiente (parcialmente gracias a Gaia). Pero estos estudios del “sistema Tierra”, por muy importantes que hayan sido sus descubrimientos, han tendido a considerar las influencias biológicas en los procesos terrenales en la misma categoría que los procesos abióticos. Los científicos de Gaia, en contraste, han rastreado insistentemente la influencia de Vida para hacerla más visible. Para hacer Gaia visible, se ha hecho una importante pregunta contrafactual – o del tipo “¿y si...?” –: ¿Cómo se vería la Tierra si Vida no hubiera influido en su ambiente? (Dietrich y Perron, 2006; Dutreuil, 2014; Lovelock, 1965).

Desde los efectos sobre el ambiente a su regulación

La comprensión de Lovelock (1965) de que Vida alteraba masivamente su ambiente lo condujo rápidamente a sugerir una nueva entidad formada por las interacciones entre Vida y su ambiente – Gaia – y que esa “influencia” podría no ser “en vano”: podría explicar la supervivencia y la prosperidad de la misma Vida.

Borrando los límites entre la vida y su ambiente

Los organismos pueden sobrevivir solo bajo ciertas condiciones. Además de agua líquida, una fuente de energía libre y todos los materiales que necesitan para construir sus cuerpos, los organismos también requieren unas condiciones particulares de temperatura, pH, presión, estado de oxidación, etc. Los organismos más complejos típicamente tienen unos requerimientos de habitabilidad más rigurosos que los organismos simples.

Estudiar los mecanismos por los cuales los organismos lidian con sus ambientes materiales ha llevado a ecólogos y fisiólogos – y ocasionalmente a biólogos evolucionistas – a darse cuenta de cómo de difusos son los límites entre los organismos y su ambiente. Surge de este modo la noción de ecosistema, o más recientemente, la noción de “fenotipo extendido”, “construcción de nicho” u “organismo extendido”. Por ejemplo, si uno está interesado en saber cómo una sola termita lidia con sus requerimientos vitales de oxígeno, CO₂ y temperatura, tiene que seguir todas las conexiones materiales involucradas en estos procesos. Para hacerlo, uno pasará a través de las cutículas de la termita tantas veces que la entidad biológica relevante de estudio – y así, de alguna manera, el límite material de esta única termita – será todo el termitero (Turner, 2000).

Al principio, Lovelock y Margulis ampliaron estos dos argumentos. Si los organismos tienen condiciones de existencia, agregarlas todas juntas necesariamente lleva a la conclusión de que Vida también tiene límites de habitabilidad. Por debajo de un mínimo dado y por encima de un máximo dado – los cuales pueden cambiar con la evolución – Vida dejaría de existir. Además, dado que Vida influye masivamente en su ambiente, al igual que pasa con el argumento expuesto para la termita (o para cualquier sistema ecológico), los límites entre Vida y su ambiente se hacen difusos y sus interacciones constituyen una entidad compleja: Gaia.

Reconociendo la existencia de esta entidad, Lovelock y Margulis escalaron familiares preguntas biológicas y, al hacerlo, introdujeron nuevos puzzles biológicos. En particular: ¿ha mantenido Vida la habitabilidad de la Tierra?

Habitabilidad

La discusión sobre habitabilidad se ha centrado en el clima, después de que Lovelock y Margulis (1974) propusieran que la estabilidad del clima a largo plazo, a pesar del aumento de la luminosidad del Sol (la “paradoja del Sol joven y débil”), puede explicarse por la influencia de Vida sobre el clima. Después de la propuesta de un regulador del clima abiótico (Walker et al., 1981) en forma de retroalimentación negativa que involucraría a la meteorización de silicatos y a la absorción asociada de CO₂, se sugirieron mecanismos más concretos que podrían amortiguar las variaciones de la temperatura superficial de un planeta y así mantener el agua líquida por encima de un rango más amplio de luminosidad que en ausencia de retroalimentación. Esta retroalimentación abiótica podría ensanchar la zona habitable delimitada entre 0°C, donde tiene lugar la congelación, y ~70 °C (en lugar del punto de ebullición de 100 °C) donde tiene lugar el efecto “invernadero húmedo” (el océano se evapora para crear una atmósfera tipo olla a presión).

La diferencia crucial con Vida viéndose entrelazada en bucles de retroalimentación es lo que trae, por definición, restricciones de habitabilidad (así como efectos abióticos) a estos bucles de retroalimentación: Vida afecta a las variables ambientales, del mismo modo que a procesos abióticos; con la diferencia de que Vida es sensible a aquello que hace dentro de las condiciones habitables, mientras que los procesos abióticos no lo son. Esto puede hacer más fuertes las retroalimentaciones negativas (un regulador más efectivo) que en el caso abiótico. Por ejemplo, Vida amplifica fuertemente la retroalimentación de meteorización de silicatos en la Tierra hoy en día (Lovelock y Watson, 1982; Lovelock y Whitfield, 1982) y tener organismos tales como las plantas, con límites de habitabilidad más estrechos que 0-70 °C entrelazados en el bucle de retroalimentación, da lugar a rangos estabilizadores más estrechos. Además, el efecto biogénico de meteorización de las plantas podría ser ahora tan fuerte (Schwartzman y Volk, 1989) que podría mantener la Tierra en un estado habitable para las mismas plantas, cuando sin ellas la Tierra podría haberse vuelto (o podría volverse en poco tiempo) demasiado caliente para que estas pudieran sobrevivir (Lenton and von Bloh, 2001). Esto está apoyado por recientes modelos de captura de los efectos de interacción del vapor de agua, el CO₂ y el N₂, los cuales sugieren que

la “zona habitable” iría desapareciendo en ausencia de Vida, que la ha ampliado considerablemente (Goldblatt, 2016).

Regulación

Junto con el problema de la habitabilidad, los científicos de Gaia buscaron ejemplos donde la actividad de ciertos seres vivos (ciertas partes de Vida) regulen una variable ambiental, produciendo y manteniendo así su propia condición de existencia (y algunas veces la de otros) en una escala regional o global.²

El clima, a varias escalas temporales, ha sido de nuevo un importante foco de estudio. Por ejemplo, la famosa hipótesis Charlson-Lovelock-Andreae-Warren (CLAW) destacó la posibilidad de una regulación climática via producción biogénica de DMS (Charlson et al., 1987). Esta llamó la atención de climatólogos, bioquímicos y científicos del sistema terrestre. Otro ejemplo importante se ve en los efectos a gran escala de las plantas terrestres en el ciclo hidrológico: por ejemplo, el incremento de la precipitación habilitado por la evapotranspiración de la selva amazónica es necesario para que la selva persista (Betts, 1999). Más generalmente, la evapotranspiración de las plantas incrementa el flujo de calor latente sobre la tierra hasta tres veces en comparación con un mundo desértico (Kleidon et al., 2000). El efecto de enfriamiento resultante es generalmente más fuerte en los trópicos, donde este sobrepasa el efecto de la vegetación en la disminución del albedo superficial (Betts, 1999). A escalas temporales más grandes, se ha argumentado también que los organismos planctónicos calcificantes, al amortiguar la concentración de iones carbonato en los océanos y estabilizando así el ciclo del carbono, pueden haber prevenido el retorno de los catastróficos eventos de “Glaciación Global” durante el Fanerozoico (Ridgwell et al., 2003).

La regulación de los componentes químicos también ha sido escrutada, como la regulación a largo plazo del oxígeno atmosférico, restringido entre límites no demasiado altos para permitir vegetación sostenida y no demasiado bajos para permitir vida animal multicelular que use la respiración. Los mecanismos de regulación del CO₂ atmosférico fueron propuestos originalmente para involucrar producción y fuegos biogénicos de metano (Watson et al., 1978). Sugerencias posteriores dependen del exceso de O₂ como causante de fuegos que supriman la vegetación terrestre y hagan la fotosíntesis de las plantas menos eficiente. En una retroalimentación, el fuego transfiere fósforo desde la tierra a los océanos, donde menos oxígeno es producido por unidad de fósforo (Kump, 1988). En otra, suprimir la vegetación suprime la meteorización de fósforo, limitando así la producción de oxígeno (Lenton et al., 2018b).

Las propuestas para aquello que regula el nitrógeno bio-disponible en los océanos en realidad depredan la hipótesis Gaia (Redfield, 1934, 1958) y se entiende que implican una retroalimentación negativa sobre la abundancia de fijadores de nitrógeno (que suministran nitrógeno disponible): la fijación de nitrógeno es altamente intensiva energéticamente y solo ventajosa de llevar a cabo cuando el nitrógeno es escaso, además de que aumenta los niveles de nitrógeno – limitando así su propia actividad (Lenton and Watson, 2000a) –.

Gaia, el sistema Tierra y la biología

La descripción empírica de los mecanismos por los que Vida puede mantener condiciones habitables o ciertos seres vivos pueden regular las variables ambientales globales/regionales han sido el sello de distinción de la investigación de Gaia. Esta investigación ha fallado a través de las rupturas entre la ESS y la biología: los científicos del sistema terrestre han mostrado poco interés en entidades vivas (no humanas) que mantengan sus propias condiciones de existencia; los biólogos han mostrado poco interés en el material empírico sobre el clima y el medio ambiente global y pensado que los problemas teóricos fueron descartados hace tiempo.

Desde la afirmación de funciones con objetivo a una teoría viable

Llegamos ahora a la razón final – y la más frecuentemente citada – por la que muchos científicos rechazan Gaia: la invocación de Lovelock de unas funciones con objetivo y la aparente intencionalidad que viene con ella. Inicialmente, esto se agravó por una falta de mecanismos teóricos que pudieran proporcionar una explicación de cómo podría ocurrir la “adaptación global” – especialmente un predominio de la regulación –.

La provocación teleológica

Desde el momento en que Lovelock descubrió Gaia, le atribuyó sus funciones, metas y normas. Lovelock estaba buscando el “rol” de varias de las influencias de Vida sobre el ambiente: ¿Cuál es la *función* de los metanógenos dentro de Gaia? ¿Y de la selva amazónica?

Lovelock introdujo las ideas de retroalimentación, auto-regulación, homeostasis y búsqueda de objetivo de la cibernética. El discurso funcional no ha molestado en general a ingenieros o científicos entrenados en cibernética: es muy común en análisis de sistemas, donde la función de una entidad dentro del sistema mayor estudiado por el científico se reduce a los efectos causales que esta entidad tiene en otras partes del sistema (Cummins, 1975). Este tipo de discurso funcional no implica normas: no especifica qué *debería* hacer la entidad en un sistema concreto. Pero Lovelock, aunque la idea resultara atractiva para esta tradición cibernética, se refería a algo más cuando hablaba de la “función” de las partes vivas de Gaia. Estaba usando también un significado biológico de función.

Lovelock atribuyó una función a las partes de Gaia del mismo modo que solemos hacerlo espontáneamente con otras formas de vida cuando hablamos (por ejemplo) de la función de los órganos dentro de un cuerpo. En este contexto, atribuir una función a una entidad es normativo: cuando decimos que la función del corazón es la de bombear sangre, nos referimos a que el corazón *se supone que debe* bombear sangre. Esto activó la principal objeción de Dawkins (1982) a Gaia: el discurso funcional solo suena científico cuando se aplica a entidades sujetas a la selección natural – y bajo este punto de vista, siendo una población compuesta por un solo individuo y con pocos indicios de reproducción, Gaia no ha estado sujeta a la selección natural –. Pero por supuesto el problema de la teleología, incluso para organismos (es decir, la vida), es uno de grandes dimensiones. Está incrustado en las discusiones desde la teología natural del siglo XVIII, donde las funciones de los órganos dentro de los organismos o de las especies en la superficie de la Tierra fueron diseñadas por Dios, o donde el diseño aparente de una entidad biológica se usó para probar la existencia de Dios. También está vinculado al reconocimiento de la especificidad de la vida (v minúscula) como una clase particular de entidad radicalmente diferente de las entidades inorgánicas. Reflexiones sobre la especificidad y el estatus de los organismos llevaron a la constitución de la biología como disciplina y estuvieron acompañados de reflexiones más amplias sobre el orden de la naturaleza – más famosamente desplegado por Kant (Huneman, 2008) –. Aunque a menudo se dice que Darwin resolvió el problema biológico del diseño de los organismos, los filósofos, al tiempo en que Dawkins estaba escribiendo, estaban todavía luchando por dotar de sentido a la teleología biológica (Millikan, 1989; Neander, 1991; Wright, 1973). Por lo tanto, el descarte de este problema cuando había sido descubierta una entidad biológica totalmente nueva fue, como mínimo, prematuro (Latour y Lenton, 2019).

Los biólogos abogan por un mecanismo, los científicos del sistema Tierra pierden la necesidad de una teoría

La crítica teleológica estaba vinculada a una teórica: los biólogos han argumentado que faltaba un mecanismo productor de una regulación global. Dicho mecanismo necesitaría hacer el mismo trabajo explicativo que hace la selección natural explicando la adaptación de los organismos y legitimando un discurso funcional en biología. Pero ellos podrían no ver de qué mecanismo se trata, si la selección natural no puede operar en Gaia porque esta no es parte de una población y no se reproduce (Dawkins, 1982). Salvo uno o dos, como H. D. Hamilton, que se dieron cuenta de que podría haber algo parecido de alguna manera a la selección natural (Lenton, 2005) – es decir, un filtro de variación en el que las variantes reguladoras llegaron a persistir y por lo tanto a predominar (en contraposición a la idea de que los miembros de una población que dejen más descendientes llegan a predominar) –.

En la ESS nunca hubo este reconocimiento de la necesidad de un mecanismo “evolutivo” para explicar Gaia. En cambio, los críticos de la hipótesis Gaia dentro de la ESS presentaron ejemplos de “desestabilización” por parte de Vida (Kirchner, 1989; Tyrrel, 2013), por ejemplo, la fotosíntesis oxigénica introdujo un veneno para la mayor parte de la biosfera en ese momento; la expansión de la fotosíntesis oxigénica ha iniciado glaciaciones, entre las que posiblemente se incluyan los eventos de “Glaciación Global” (Kropp et al., 2005); y las disrupciones en el ciclo biológico del azufre pueden haber sido responsables de la mayor extinción del Fanerozoico (Ward, 2009). Pero uno no necesita esperar a que Kirchner (1989) o Tyrrell (2013) encuentren ejemplos que refuten la idea de que los seres vivos *siempre* regulan su ambiente – los autores de Gaia ya los habían proporcionado (Margulis y Lovelock, 1974) –.

Como Lovelock fue bien consciente desde el principio, presentar casos de desestabilización como una refutación de Gaia no tiene en cuenta un entendimiento básico ni de la biología ni de la cibernética. En biología, solo porque podemos sufrir cáncer no significa que no seamos organismos autorregulados (Doolittle, 2019). En cibernética, cualquier respuesta tipo “función sombrero” (por ejemplo, parábola inventada) de Vida a una variable ambiental junto con un efecto de Vida sobre dicha variable puede originar regímenes de retroalimentación tanto positivos como negativos. Lovelock consagró esto en la formulación del modelo “Mundo de Margaritas” (Watson y Lovelock, 1983) y enfatizó más tarde, por ejemplo, que la retroalimentación del DMS puede ser positiva o negativa dependiendo de las circunstancias (Lovelock and Kump, 1994). El segundo libro de Lovelock, “Las Edades de Gaia” (Lovelock, 1988), depende de este reconocimiento – los intervalos donde la desestabilización predomina marcan los límites entre las “Edades”, en las cuales predomina la regulación –.

“Si Gaia estabiliza y desestabiliza, ¿existe algún comportamiento posible que no sea Gaiano?” preguntó Kirchner (1989), como respuesta. Otros han sugerido que la validez de Gaia podría resolverse simplemente contando mecanismos de retroalimentación positivos y negativos (Ward, 2009). Este argumento recurrente destaca el hecho de que la mayoría de los científicos del sistema Tierra discuten Gaia a nivel empírico y no teórico. Por supuesto, existía trabajo teórico en otros aspectos del sistema Tierra – incluyendo cómo los humanos podrían mantener sus propias condiciones de habitabilidad planetaria (Schellnhuber, 1999; Schellnhuber y Wenzel, 1998) – pero muy poco compromiso teórico con Gaia. Mientras tanto, los ejemplos empíricos de regulación global nunca fueron suficientes para responder a los biólogos – debido a que su verdadero interés residía en las propiedades abstractas de las entidades vivientes—. El único modo de salir de este punto muerto fue teorizar sobre Gaia.

Modelos y teoría en respuesta

Después de que los biólogos abandonaran el escenario, y los científicos del sistema Tierra hubieran declinado ampliamente entrar en él, una pequeña banda asumió el desafío de teorizar sobre Gaia.

El modelo Mundo de Margaritas (o “parábola”) fue formulado para demostrar un mecanismo abstracto por el cual las entidades vivas podrían, en principio, regular el medio ambiente global sin ninguna teleología o inconsistencia con la selección natural (Watson y Lovelock, 1983). Este modelo se convirtió rápidamente en el centro de una discusión teórica sobre Gaia (Betts y Lenton, 2007; Lenton et al., 2018a; Lenton y Lovelock, 2001; McDonald-Gibson et al., 2008; Volk, 2002; Watson y Lovelock, 1983). Después de que se señalara que la primera versión del modelo representaba un caso especial de emparejamiento entre la vida y su ambiente (Kirchner, 1989), los teóricos centraron sus esfuerzos en entender las condiciones bajo las que un mecanismo es regulador o desestabilizante. Por lo tanto, analizaron la diversidad de los comportamientos dinámicos en un sistema de Gaia (oscilaciones, catástrofes, puntos de inflexión entre regímenes de estabilidad, etc.), cómo cambiar de un comportamiento a otro, cómo de frecuente y de probable es un mecanismo concreto, etc. (Lenton et al., 2018a; Wood et al., 2008). Esto podría ser descrito bajo un enfoque de sistemas complejos (Scheffer, 2009) – aunque el modelo Mundo de Margaritas precede significativamente al alza de la “ciencia de la complejidad” –.

Respondiendo a la persistente confusión de Gaia con el altruismo, se ha reconocido que los efectos de Vida a gran escala espacial y en períodos de tiempo largos deben estar basados en subproductos de selección (como la producción de oxígeno es un subproducto de la fotosíntesis oxigénica, la cual no es seleccionada *por* la producción de oxígeno sino por la captura de energía; Lenton, 1998; Volk, 1998; Wilkinson, 1999). Se pusieron además restricciones a las condiciones en las que surge la regulación: por ejemplo, las dinámicas evolutivas del rasgo responsable de la modificación del ambiente deberían ser más rápidas que las de las preferencias ambientales de las entidades vivas (Lenton y Lovelock, 2001; McDonald-Gibson et al., 2008; Robertson y Robinson, 1998; Wood et al., 2006).

En escalas espaciales más pequeñas y períodos de tiempo más cortos se vieron elementos de una teoría de Gaia como mínimo “compatibles” con la selección natural. Esto significó o bien extender o bien articular los mecanismos de selección estándar como la selección de grupo (Williams y Lenton, 2008); introduciendo conceptos ajenos al pensamiento evolutivo tales como la “retroalimentación sobre el crecimiento” (un rasgo que beneficia indistintamente a todas las entidades vivientes sin ningún efecto diferencial – o selectivo –; Lenton, 1998; Williams y Lenton, 2008) o extendiendo las condiciones de aplicación de los mecanismos de selección.

Reconociendo que los críticos de Gaia pueden haber presupuesto una definición demasiado estrecha de cómo puede ocurrir la evolución – requiriendo variación dentro de las poblaciones y replicación con heredabilidad – se han creado dos argumentos independientes para un mecanismo de filtrado más crudo que no requiere reproducción: la idea de una “selección secuencial” (Betts y Lenton, 2007; Lenton et al., 2018^a), y la de “selección solo por supervivencia”, es decir, basada solo en la persistencia en el tiempo – lo que marcaba el retorno de Doolittle (2014), apoyándose en Bouchard (2014) –. En el mecanismo de selección secuencial, la idea central es que a través de una serie de intentos/experimentos a lo largo del tiempo, los efectos de Vida sobre su ambiente podrían haber tropezado con atractores estables, los cuales por definición tienden a persistir. La selección basada solo en la persistencia (Doolittle, 2014) brinda entonces la oportunidad para el fenómeno Gaia resultante de adquirir posteriores mecanismos de persistencia-mejora (estabilizadores). Después, Doolittle ofreció tanto ciclos biogeoquímicos (Doolittle, 2017) como clados que incluyen a Vida (Doolittle, 2019) como unidades relevantes de

selección basados en la persistencia diferencial – teniendo en cuenta que ambos forman poblaciones de algún tipo –.

Siguiendo la tradición de la biología teórica, todas estas investigaciones presentan algunas propiedades *específicas* de la vida, las cuales son tanto propias de las entidades vivas como necesarias para que surjan los mecanismos reguladores: (1) la respuesta en forma de pico del crecimiento a la variación del ambiente; (2) el efecto inevitable del metabolismo sobre el ambiente y (3) la capacidad de extinción y la aptitud de volver a empezar.

La continua necesidad de síntesis

En retrospectiva, podemos mirar estos continuos esfuerzos teóricos y de modelo como descripciones de las propiedades abstractas de Vida y de Gaia – es decir, Vida más sus efectos en habitabilidad –. Las décadas que abarcan la constitución de la biología a la vuelta de la segunda mitad del siglo XVIII fueron un tiempo de reflexión activa sobre las propiedades abstractas de la vida (desde la especificidad de los “organismos” a la naturaleza de la causalidad en juego en biología) y un tiempo de intensas observaciones y experimentos empíricos (como la llegada de la embriología comparativa y experimental; de la anatomía, paleontología y fisiología comparativas y de la medicina moderna). De manera similar, aquí el reconocimiento de la existencia de Vida y de Gaia requerían y todavía requieren esfuerzos empíricos, teóricos y filosóficos.

Resumen

Gaia ha sido famosamente criticada por biólogos y por científicos del sistema Tierra. Los biólogos han señalado la falta de mecanismos teóricos de regulación, junto con una crítica al lenguaje teleológico de Lovelock cuando se tomó demasiado en serio la idea de que Gaia estaba viva. Los ejemplos empíricos de regulación global despertaron poco interés en ellos, y habiendo perdido la novedad de las entidades Vida y Gaia, descartaron quizás demasiado rápido los problemas teóricos como insolubles. Por contraste, los científicos del sistema Tierra, habiendo garantizado que todos los seres vivos son parte de dicho sistema, omitieron enormemente los desafíos teóricos y filosóficos en auge por la centralidad de Vida en Gaia. Al hacerlo, se restringieron en gran medida a sí mismos a las discusiones empíricas sobre cómo funciona el sistema Tierra en realidad. Si desplegaron los esfuerzos teóricos – del tipo de los que están en juego en el Mundo de Margaritas, es decir, jugando con modelos de juguete para explorar los posibles espacios de comportamientos – estos esfuerzos, aunque influenciados de alguna manera por las investigaciones Gaianas, estuvieron atados al entendimiento del sistema Tierra habitado por los humanos y a las consecuencias de este entendimiento en los cambios globales futuros (Schellnhuber y Wenzel, 1998).

La respuesta a estas críticas generalmente ha sido: (1) arrepentirse del lenguaje teleológico y (2) señalar un importante suceso de Gaia con la constitución de la ESS. Este artículo le ha dado la vuelta a estos dos argumentos: (1) la dimensión teleológica de Gaia debe ser confrontada directamente, en vez de ser evitada para complacer a los biólogos; (2) la ESS, aunque influenciada por Gaia en muchos aspectos, ha perdido de vista la posición central de Vida.

La contribución central de Lovelock, ayudado por Margulis, fue la de descubrir una nueva entidad viviente: Vida. Demasiado grande y extraña para ser estudiada por los biólogos; demasiado difícil de detectar en el balance energético para ser tenida en cuenta por los primeros climatólogos; demasiado viviente para ser completamente aceptada por los científicos del sistema Tierra. Y sin embargo Vida altera masivamente su ambiente global. Tanto que se vuelve difícil separar los

límites de Vida con su ambiente, surgiendo así el nombre dado a la complicada entidad resultante de estas interacciones: Gaia. Estudiar los comportamientos fisiológicos y ecológicos de esta entidad ha sido el programa de investigación central de Gaia: ¿podría Vida mantener sus propias condiciones de existencia? ¿Cuáles son las propiedades y comportamientos generales de una entidad global constituida por la interacción entre Vida y su ambiente?

El genio de Lovelock y Margulis fue el de detectar a la esquiva Gaia dentro del sistema Tierra. Dos asuntos merecen una mayor discusión que dejaremos para documentos futuros: una historia más detallada de la ESS y su relación con Gaia y una discusión seria sobre la teleología de Gaia, vinculando los esfuerzos teleológicos desarrollados por la comunidad de científicos Gaianos con los debates filosóficos sobre la causalidad y sobre el modo en que Gaia ha cambiado lo que entendemos por “vida”.

Declaración de conflicto de intereses

El/los autor(es) no declararon conflictos de interés con respecto a la investigación, autoría y/o publicación de este artículo

Financiación

El/los autor(es) revelaron la recepción del siguiente apoyo financiero a la investigación, autoría y/o publicación de este artículo: Bruno Latour beneficiario de una beca de Zentrum für Kunst und Medien, Karlsruhe.

ORCID iD

Timothy M Lenton <https://orcid.org/0000-0002-6725-7498>

Notas

1. Tiene que haber otros seres vivos pertenecientes a otros clados que provinieran del origen de la vida (y que estuvieran presentes en el tiempo del último ancestro común universal), todos los miembros de los cuales se habrían extinguido ya. Por lo tanto “Vida” no incluye todo lo que ha vivido alguna vez en la Tierra.

2. Estos estudios pueden ser leídos tanto como parte de la discusión sobre habitabilidad – para que ciertas partes de Vida mantengan sus condiciones de existencia a una escala suficientemente grande es *a fortiori* para mantener condiciones habitables – o como nuevos programas de investigación – ya que las grandes escalas espaciales involucradas fueron descuidadas por los biólogos que trabajaban en las interacciones vida-ambiente en escalas más pequeñas –.

Referencias

- Amachi S (2008) Microbial contribution to global iodine cycling: Volatilization, accumulation, reduction, oxidation, and sorption of iodine. *Microbes and Environments* 23: 269–276.
- Benner R (2011) Loose ligands and available iron in the ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108: 893–894.
- Berner RA (1999) A new look at the long-term carbon cycle. *GSA Today* 9: 1–6.
- Betts RA (1999) Self-beneficial effects of vegetation on climate in an ocean-atmosphere general circulation model. *Geophysical Research Letters* 26: 1457–1460.
- Betts RA (2000) Offset of the potential carbon sink from boreal afforestation by decreases in surface albedo. *Nature* 408: 187–190.
- Betts RA and Lenton TM (2007) Second chances for Lucky Gaia: A hypothesis of sequential selection. *Gaia Circular* 1: 4–6.
- Bouchard F (2014) Ecosystem evolution is about variation and persistence, not populations and reproduction. *Biological Theory* 9: 382–391.
- Boucher O, Moulin C, Belviso S et al. (2003) DMS atmospheric concentrations and sulphate aerosol indirect radiative forcing: A sensitivity study to the DMS source representation and oxidation. *Atmospheric Chemistry and Physics* 3: 49–65.
- Campbell IH and Taylor SR (1983) No water, no granites: No oceans, no continents. *Geophysical Research Letters* 10: 1061–1064.
- Catling DC, McKay CP and Zahnle KJ (2001) Biogenic methane, hydrogen escape, and the irreversible oxidation of early Earth. *Science* 293: 839–843.
- Charlson RJ, Lovelock JE, Andreae MO et al. (1987) Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature* 326: 655–661.
- Condie KC (2005) *Earth as an Evolving Planetary System*. Cambridge, MA: Academic Press.
- Conway EM (2008) *Atmospheric Science at NASA: A History*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press.
- Crutzen PJ (2002) A critical analysis of the Gaia hypothesis as a model for climate/biosphere interactions. *Gaia* 11: 96–103.
- Crutzen PJ (2004) Anti-Gaia. In: Steffen W, Sanderson A, Tyson P et al. (eds) *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. Berlin: Springer, p. 72.
- Crutzen PJ and Stoermer EF (2000) The ‘Anthropocene’. *IGBP Newsletter* 41: 17–18.
- Cummins R (1975) Functional analysis. *The Journal of Philosophy* 72: 741–765.
- Dahan A (2010) Putting the Earth System in a numerical box? The evolution from climate modeling toward global change. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 41: 282–292.
- Dawkins R (1982) *The Extended Phenotype*. Oxford: Oxford University Press.

- Dietrich WE and Perron JT (2006) The search for a topographic signature of life. *Nature* 439: 411–418.
- Doel RE (2003) Constituting the postwar Earth sciences: The military's influence on the environmental sciences in the USA after 1945. *Social Studies of Science* 33: 635–666.
- Doolittle WF (1981) Is nature really motherly? *The Coevolution Quarterly* 29: 58–63.
- Doolittle WF (2014) Natural selection through survival alone, and the possibility of Gaia. *Biology & Philosophy* 29: 415–423.
- Doolittle WF (2017) Darwinizing Gaia. *Journal of Theoretical Biology* 434: 11–19.
- Doolittle WF (2019) Making evolutionary sense of Gaia. *Trends in Ecology & Evolution* 34: 889–894.
- Dutreuil S (2014) What good are abstract and what-if models? Lessons from the Gaia hypothesis. *History and Philosophy of the Life Sciences* 36: 16–41.
- Dutreuil S (2016) Gaia: hypothese, programme de recherche pour le systeme Terre, ou philosophie de la nature? (PhD Thesis, Universite Paris 1 Pantheon-Sorbonne, Paris, p. 859.).
- Dutreuil S (2018) La vie en biologie: enjeux et problemes d'une definition, usages du terme. *Philosophie* 1: 67–94.
- Dutreuil S and Pocheville A (2015) Les organismes et leur environnement: la construction de niche, l'hypothese Gaia et la selection naturelle. *Bulletin d'histoire et d'epistemologie des sciences de la vie* 22: 27–56.
- Dyke JG, Gans F and Kleidon A (2011) Towards understanding how surface life can affect interior geological processes: A non-equilibrium thermodynamics approach. *Earth System Dynamics* 2: 139–160.
- Edwards PN (2010) *A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Foley SF and Fischer TP (2017) An essential role for continental rifts and lithosphere in the deep carbon cycle. *Nature Geoscience* 10: 897–902.
- Fowler D, Coyle M, Skiba U et al. (2013) The global nitrogen cycle in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 368: 20130164.
- Frouin R and Iacobellis SF (2002) Influence of phytoplankton on the global radiation budget. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 107: 4377.
- Gauthier-Lafaye F, Holliger P and Blanc PL (1996) Natural fission reactors in the Franceville basin, Gabon: A review of the conditions and results of a 'critical event' in a geologic system. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60: 4831–4852.
- Goldblatt C (2016) The inhabitation paradox: How habitability and inhabitancy are inseparable (arxiv: 160300950). Available at: <https://arxiv.org/abs/1603.00950>
- Goldblatt C, Claire MW, Lenton TM et al. (2009) Nitrogen-enhanced greenhouse warming on early Earth. *Nature Geoscience* 2: 891–896.
- Goldstein ES (2009) NASA's Earth science program: The space agency's mission to our home planet. In: Dick SJ (ed.) *Nasa's First 50 Years: Historical Perspectives*. Washington, DC: NASA, pp. 503–542.

- Grosch EG and Hazen RM (2015) Microbes, mineral evolution, and the rise of micro-continents: Origin and co-evolution of life with early Earth. *Astrobiology* 15: 922–939.
- Hamblin JD (2013) *Arming Mother Nature: The Birth of Catastrophic Environmentalism*. Oxford: Oxford University Press.
- Haqq-Misra JD, Kasting JF and Lee S (2011) Availability of O₂ and H₂O₂ on pre-photosynthetic Earth. *Astrobiology* 11: 293–302.
- Hazen RM, Papineau D, Bleeker W et al. (2008) Mineral evolution. *American Mineralogist* 93: 1693–1720.
- Heymann M and Dahan Dalmedico A (2019) Epistemology and politics in Earth system modeling: Historical perspectives. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11: 1139–1152.
- Hitchcock DR and Lovelock JE (1967) Life detection by atmospheric analysis. *Icarus* 7: 149–159.
- Huneman P (2008) *Metaphysique et biologie Kant et la constitution du concept d'organisme: E' ditions Kime*. Paris: Kime.
- Johnson BW and Goldblatt C (2018) EarthN: A new Earth system nitrogen model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 19: 2516–2542.
- Kwa C and Rector R (2010) A data bias in interdisciplinary cooperation in the sciences: Ecology in climate change research. In: Parker JN, Vermeulen N and Penders B (eds) *Collaboration in the New Life Sciences*. Farnham: Ashgate, pp. 161–176.
- Kagoshima T, Sano Y, Takahata N et al. (2015) Sulphur geodynamic cycle. *Scientific Reports* 5: 8330.
- Kerr B, Godfrey-Smith P and Feldman MW (2004) What is altruism? *Trends in Ecology & Evolution* 19: 135–140.
- Kesselmeier J and Staudt M (1999) Biogenic volatile organic compounds (VOC): An overview on emission, physiology and ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry* 33: 23–88.
- Kirchner JW (1989) The Gaia hypothesis: Can it be tested? *Reviews of Geophysics* 27: 223–235.
- Kleidon A, Fraedrich K and Heimann M (2000) A green planet versus a desert world: Estimating the maximum effect of vegetation on the land surface climate. *Climatic Change* 44: 471–493.
- Kopp RE, Kirschvink JL, Hilburn IA et al. (2005) The Paleoproterozoic snowball Earth: A climate disaster triggered by the evolution of oxygenic photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102: 11131–11136.
- Kump LR (1988) Terrestrial feedback in atmospheric oxygen regulation by fire and phosphorus. *Nature* 335: 152–154.
- Kwa C (2005a) Interdisciplinarity and postmodernity in the environmental sciences. *History and Technology* 21: 331–344.
- Kwa C (2005b) Local ecologies and global science discourses and strategies of the international geosphere-biosphere programme. *Social Studies of Science* 35: 923–950.
- Kwa C (2006) The programming of interdisciplinary research through informal science-policy interactions. *Science and Public Policy* 33: 457–467.
- Laland K, Matthews B and Feldman MW (2016) An introduction to niche construction theory. *Evolutionary Ecology* 30: 191–202.
- Latour B (2017) *Facing Gaia: Eight Lectures on the New Climatic Regime*. Cambridge: Polity Press.

- Latour B and Lenton TM (2019) Extending the Domain of Freedom, or Why Gaia Is So Hard to Understand. *Critical Inquiry* 45: 659–680.
- Lenton T (2016) *Earth System Science: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press.
- Lenton TM (1998) Gaia and natural selection. *Nature* 394: 439–447.
- Lenton TM (2005) Hamilton and Gaia. In: Ridley M (ed.) *Narrow Roads of Gene Land: The Collected Papers of W. D. Hamilton: Last Words*, vol. 3. Oxford: Oxford University Press, pp. 257–264.
- Lenton TM and Latour B (2018) Gaia 2.0. *Science* 361: 1066–1068.
- Lenton TM and Lovelock JE (2001) Daisyworld revisited: Quantifying biological effects on planetary self-regulation. *Tellus B* 53: 288–305.
- Lenton TM and von Bloh W (2001) Biotic feedback extends the life span of the biosphere. *Geophysical Research Letters* 28: 1715–1718.
- Lenton TM and Watson AJ (2000a) Redfield revisited: 1: Regulation of nitrate, phosphate and oxygen in the ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 14: 225–248.
- Lenton TM and Watson AJ (2000b) Redfield revisited: 2: What regulates the oxygen content of the atmosphere? *Global Biogeochemical Cycles* 14: 249–268.
- Lenton TM and Watson AJ (2011) *Revolutions That Made the Earth*. Oxford: Oxford University Press.
- 22 *The Anthropocene Review* 0(0)
- Lenton TM, Daines SJ, Dyke JG et al. (2018a) Selection for Gaia across multiple scales. *Trends in Ecology & Evolution* 33: 633–645.
- Lenton TM, Daines SJ and Mills BJW (2018b) COPSE reloaded: An improved model of biogeochemical cycling over Phanerozoic time. *Earth Science Reviews* 178: 1–28.
- Lenton TM, Held H, Kriegler E et al. (2008) Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105: 1786–1793.
- Lenton TM, Schellnhuber HJ and Szathmáry E (2004) Climbing the co-evolution ladder. *Nature* 431: 913.
- Lewontin RC (1983) The organism as the subject and object of evolution. *Scientia* 118: 63–82.
- Linzon SN, Temple PJ and Pearson RG (1979) Sulfur concentrations in plant foliage and related effects. *Journal of the Air Pollution Control Association* 29: 520–525.
- Lovelock JE (1965) A physical basis for life detection experiments. *Nature* 207: 568–570.
- Lovelock JE (1972) Gaia as seen through the atmosphere. *Atmospheric Environment* 6: 579–580.
- Lovelock JE (1975a) Natural halocarbons in the air and in the sea. *Nature* 256: 193–194.
- Lovelock JE (1975b) Thermodynamics and the recognition of alien biospheres. *Proceedings of the Royal Society of London* 189: 167–181.
- Lovelock JE (1979) *Gaia: A New Look at Life on Earth*. Oxford: Oxford University Press.
- Lovelock JE (1986) Geophysiology: A new look at Earth science. *Bulletin of the American Meteorological Society* 67: 392–397.

- Lovelock JE (1988) *The Ages of Gaia: A Biography of Our Living Earth*. New York: W. W. Norton.
- Lovelock JE and Giffin CE (1969) Planetary atmospheres: Compositional and other changes associated with the presence of life. In: Tiffany OL and Zaitzeff E (eds) *Advances in the Astronautical Sciences*. Tarzana, CA: American Astronautical Society, pp. 179–193.
- Lovelock JE and Kump LR (1994) Failure of climate regulation in a geophysiological model. *Nature* 369: 732–734.
- Lovelock JE and Margulis LM (1974a) Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: The Gaia hypothesis. *Tellus* 26: 2–10.
- Lovelock JE and Margulis LM (1974b) Homeostatic tendencies of the Earth's atmosphere. *Origins of Life* 5: 93–103.
- Lovelock JE and Watson AJ (1982) The regulation of carbon dioxide and climate: Gaia or geochemistry? *Planetary and Space Science* 30: 795–802.
- Lovelock JE and Whitfield M (1982) Life span of the biosphere. *Nature* 296: 561–563.
- Lovelock JE, Maggs RJ and Rasmussen RA (1972) Atmospheric dimethyl sulphide and the natural sulphur cycle. *Nature* 237: 452–453.
- Lovelock JE, Maggs RJ and Wade RJ (1973) Halogenated hydrocarbons in and over the Atlantic. *Nature* 241: 194–196.
- McDonald-Gibson J, Dyke JG, Di Paolo EA et al. (2008) Environmental regulation can arise under minimal assumptions. *Journal of Theoretical Biology* 251: 653–666.
- McGuffie K and Henderson-Sellers A (2014) *The Climate Modelling Primer*. 4th edition. Chichester: Wiley Blackwell.
- Margulis L and Lovelock JE (1974) Biological modulation of the Earth's atmosphere. *Icarus* 21: 471–489.
- Mariscal C and Doolittle WF (2018) Life and life only: A radical alternative to life definitionism. *Synthese*. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11229-018-1852-2>
- Matrai PA and Keller MD (1994) Total organic sulfur and dimethylsulfoniopropionate in marine phytoplankton: Intracellular variations. *Marine Biology* 119: 61–68.
- Millikan RG (1989) In defense of proper functions. *Philosophy of Science* 56: 288–302.
- NASA ESSC (1986) *Earth System Science: A Closer View*. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration.
- Neander K (1991) Functions as selected effects: The conceptual analyst's defense. *Philosophy of Science* 58: 168–184.
- Popp M, Schmidt H and Marotzke J (2016) Transition to a moist greenhouse with CO₂ and solar forcing. *Nature Communications* 7: 10627.
- Redfield AC (1934) On the Proportions of Organic Derivatives in Sea Water and Their Relation to the Composition of Plankton (James Johnstone memorial volume). Liverpool: University of Liverpool, pp. 176–192.
- Redfield AC (1958) The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist* 46: 205–221.

- Ridgwell AJ, Kennedy MJ and Caldeira K (2003) Carbonate deposition, climate stability, and Neoproterozoic ice ages. *Science* 302: 859–862.
- Robertson D and Robinson J (1998) Darwinian Daisyworld. *Journal of Theoretical Biology* 195: 129–134.
- Rockström J, Steffen W, Noone K et al. (2009) A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472–475.
- Roederer JG (1986) ICSU gives green light to IGBP. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 67: 777–781.
- Rollinson H (2007) *Early Earth Systems: A Geochemical Approach*. Oxford: Wiley Blackwell.
- Rosing MT, Bird DK, Sleep NH et al. (2006) The rise of continents: An essay on the geologic consequences of photosynthesis. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 232: 99–113.
- Sagan C, Thompson WR, Carlson R et al. (1993) A search for life on Earth from the Galileo spacecraft. *Nature* 365: 715–721.
- Saito MA, Sigman DM and Morel FMM (2003) The bioinorganic chemistry of the ancient ocean: The co-evolution of cyanobacterial metal requirements and biogeochemical cycles at the Archean-Proterozoic boundary? *Inorganica Chimica Acta* 356: 308–318.
- Scheffer M (2009) *Critical Transitions in Nature and Society*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Schellnhuber HJ (1999) ‘Earth system’ analysis and the second Copernican revolution. *Nature* 402: C19–C23.
- Schellnhuber HJ and Wenzel V (1998) *Earth System Analysis: integrating Science for Sustainability*. Berlin: Springer.
- Schwartzman DW and Volk T (1989) Biotic enhancement of weathering and the habitability of Earth. *Nature* 340: 457–460.
- Simoncini E, Virgo N and Kleidon A (2013) Quantifying drivers of chemical disequilibrium: Theory and application to methane in the Earth’s atmosphere. *Earth System Dynamics* 4: 317–331.
- Steffen W, Richardson K, Rockstrom J et al. (2020) The emergence and evolution of Earth system science. *Nature Reviews Earth and Environment* 1: 54–63.
- Steffen W, Sanderson A, Tyson P et al. (2004) *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. Berlin: Springer.
- Struyf E, Smis A, Van Damme S et al. (2009) The global biogeochemical silicon cycle. *Silicon* 1: 207–213.
- Sunda W (2012) Feedback interactions between trace metal nutrients and phytoplankton in the ocean. *Frontiers in Microbiology* 3: 204.
- Turchetti S and Roberts P (2014) *The Surveillance Imperative: Geosciences during the Cold War and Beyond*. New York: Palgrave Macmillan.
- Turner JS (2000) *The Extended Organism: The Physiology of Animal-Built Structures*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Tyrrell T (2013) *On Gaia: A Critical Investigation of the Relationship between Life and Earth*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Uhrqvist O (2014) Seeing and knowing the Earth as a system: An effective history of global environmental change research as scientific and political practice. Linköping University. Available at: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:747930/FULLTEXT01.pdf>

Volk T (1989) Sensitivity of climate and atmospheric CO₂ to deep-ocean and shallow-ocean carbonate burial. *Nature* 337: 637–640.

Volk T (1998) *Gaia's Body: Toward a Physiology of the Earth*. New York: Copernicus.

Volk T (2002) Toward a future for Gaia theory. *Climatic Change* 52: 423–430.

Walker JCG, Hays PB and Kasting JF (1981) A negative feedback mechanism for the long-term stabilisation of Earth's surface temperature. *Journal of Geophysical Research* 86: 9776–9782.

Ward PD (2009) *The Medea Hypothesis: Is Life on Earth Ultimately Self-Destructive?* Princeton, NJ: Princeton University Press.

Watson AJ and Lovelock JE (1983) Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. *Tellus B*: 35: 284–289.

Watson AJ, Lovelock JE and Margulis L (1978) Methanogenesis, fires and the regulation of atmospheric oxygen. *Biosystems* 10: 293–298.

Whitfield M (1981) The world ocean: Mechanism or machination? *Interdisciplinary Science Reviews* 6: 12–35.

Wilkinson DM (1999) Is Gaia really conventional ecology? *Oikos* 84: 533–536.

Williams HTP and Lenton TM (2008) Environmental regulation in a network of simulated microbial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105: 10432–10437.

Williams RJP and Frausto da Silva JJR (2006) *The Chemistry of Evolution: The Development of Our Ecosystem*. Amsterdam: Elsevier.

Wimsatt WC (1994) The ontology of complex systems: Levels of organization, perspectives, and causal thickets. *Canadian Journal of Philosophy* 24: 207–274.

Wood AJ, Ackland GJ and Lenton TM (2006) Mutation of albedo and growth response produces oscillations in a spatial Daisyworld. *Journal of Theoretical Biology* 242: 188–198.

Wood AJ, Ackland GJ, Dyke J et al. (2008) Daisyworld: A review. *Reviews of Geophysics* 46: RG1001.

Wright L (1973) Functions. *Philosophical Review* 82: 139–168.

Fuente y fecha de publicación originales: The Antropocene Review 16/05/2020

Traducción disponible en: <http://www.lanzarotebiosfera.org/teoria-de-gaia>